ALBERT EINSTEIN: NAVEGANTE SOLITARIO

Autor: LUIS DE LA PEÑA

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- INTRODUCCIÓN
- I. EL JOVEN EINSTEIN
- II. LOS AÑOS EN BERNA
- III. LA GRAN PROEZA

- IV. LA POLÉMICA BOHR-EINSTEIN
- V. EINSTEIN Y SU TIEMPO
- APÉNDICE 1
- APÉNDICE 2
- APÉNDICE 3
- LECTURAS SUGERIDAS
- EINSTEIN:
- COLECCIÓN DEL FCE
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Indice

Siguiente

la

ciencia /31

desde méxico

Primera edición, 1987

Sexta reimpresión, 1996

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen, también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1987, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE CV.

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-2566-8

Impreso en México

Indice

Siguiente

INTRODUCCIÓN

Limitar los conocimientos científicos

a un reducido número de personas

debilita el espíritu filosófico de un

pueblo y conduce a su debilidad espiritual.

A. EINSTEIN

En este libro se habla de Einstein, de su obra, de su tiempo. Es un libro escrito para aquellas personas que por su edad o sus ocupaciones no han tenido oportunidad de estudiar la ciencias, pero están interesadas en saber algo de ellas. Es un libro sencillo, sobre una de las personalidades más grandes que ha dado la humanidad, que tiene como intención ayudar a entender un poco de lo que hizo este gran hombre sin exigir que se lean páginas y más páginas de física.

La vida de Einstein fue muy rica y se dio en una época llena de acontecimientos históricos: aun sin proponérselo, su inmensa fama lo vinculaba con todo lo que pasaba a su alrededor. En el curso de su vida —y en buena parte debido a su obra— la física se transformó radicalmente —sería legítimo hablar de una física preeinsteiniana y de una física posteinsteiniana— antes de cumplir 30 años había ya hecho descubrimientos y propuesto teorías sorprendentes y revolucionarias que van mucho más allá de la teoría de la relatividad que es indudablemente la más famosa de sus aportaciones. Este hombre, cubierto de gloria en vida como ningún otro científico jamás lo ha sido, se supo mantener sencillo, modesto y solitario y, sin ser un revolucionario en el sentido social del término, usó su fama y u prestigio para luchar contra la tiranía, la injusticia y la explotación, contra el militarismo y el armamentismo y por la cooperación internacional y los derechos del pueblo judío.

Este pequeño libro ayuda al lector a saber un poco de todo esto; a aproximarse a su visión racional, objetiva y progresista del mundo; a conocer de cerca su profunda necesidad de plena libertad intelectual y, en fin, a asomarse a la obra científica de Einstein para encontrarlo de joven proponiendo teorías audaces, inesperadas y revolucionarias y reencontrarlo, ya de viejo, pero tan solo como antes lo estuvo, tratando de convencer de que las nuevas teorías que todos admiran son insuficientes e inadecuadas. Pensador profundo e incansable, nos dejó una enorme herencia intelectual y moral; conocerla nos acerca a lo mejor que el espíritu humano puede dar.

Soy de verdad un "viajero solitario"...

A. EINSTEIN

Indice

Siguiente

I. EL JOVEN EINSTEIN

Yo hacía lo que me dictaba mi

propia naturaleza.

A. EINSTEIN

UNA PREGUNTA ORIGINAL

—A VER: vamos a verlo con más cuidado —se decía el joven pensativo—. Supongamos que puedo correr tan rápido como se me antojara. Supongamos que corro tan rápido, que al encender mi lámpara sorda me muevo junto con la luz que sale de ella, exactamente a su velocidad. Luz y yo viajamos juntos. ¿Qué es lo que veo? ¿Cómo se ve la luz cuando viaja uno junto con ella?

Si el lector sabe la respuesta o siente que la puede dar después de pensarlo un poquito (la pregunta es realmente inesperada y no es de extrañar que lo ponga a pensar), se puede saltar un par de párrafos con entera libertad. La luz viaja con una velocidad increíble, fantástica: 300 millones de metros cada segundo. Esto significa que para viajar un millón de kilómetros, un haz de luz requiere tan sólo de poco más de 3 segundos; éste es aproximadamente el tiempo que usamos para leer la última frase (la del millón de kilómetros), y en ese ratito algún rayo de luz viajó cosa de un millón de kilómetros en algún lugar del Cosmos.

Por qué la luz viaja en el vacío a esta velocidad y no a otra es uno de tantos misterios de la física contemporánea. La velocidad de la luz es un dato experimental y constituye una de las constantes fundamentales de la física, no calculable mediante teoría física alguna. Su valor nos parece fantástico, pero podemos decir que, en alguna forma al menos está ajustado a la vez a la escala humana y a la cósmica. Por ejemplo, la luz que la Luna nos refleja nos llega en tan sólo 3 segundos, y la directa del Sol tarda apenas 8 minutos en alcanzarnos. Pero para hablar de las distancias entre las estrellas, los astrónomos usan como patrón ¡la distancia que la luz recorre en un año! ¿Podrían ustedes representarse esta distancia?

Pero, ¿por qué siempre se habla de que la luz viaja a tal velocidad? ¿Qué la luz no se puede estar quieta? No: precisamente, no. La luz, si existe, viaja; y sólo si viaja, existe. Es cono las olas del mar; ¿alguien ha visto una ola quieta en el mar? Y aunque el ejemplo de las olas no es de todo correcto, sí nos permite sentir un poco porque la luz sólo existe en movimiento; como las olas, como el sonido, la luz es también una onda que para existir tiene que propagarse, que viajar. Pero a diferencia de las olas o del sonido, que son ondas mecánicas, es decir, vibraciones o desplazamientos de ida y vuelta de las moléculas de las sustancias, la luz es una onda electromagnética. Esto quiere decir que la luz es una onda semejante a las de radio, o a los rayos X. Todas estas ondas son fenómenos muy complejos, combinación de efectos eléctricos y magnéticos simultáneamente, que se pueden dar tanto en los materiales como en el vacío y que podemos imaginarnos como vibraciones eléctricas y magnéticas simultáneamente, en tal forma que unas producen las otras y viceversa y así indefinidamente.

Lo importante aquí es que una onda electromagnética es imparable, o, más bien, que si se le detiene desaparece[1] Por ejemplo, cuando la luz cae sobre un cuerpo negro que la absorbe totalmente, simplemente desaparece como luz; su energía queda atrapada en el cuerpo que la absorbe, pero no hay más luz.

La teoría de los fenómenos de este tipo es la llamada teoría electromagnética y fue creada hace ya más de cien años. El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) fue quien dio a esta teoría básicamente la

forma que tiene hoy; fue el primero en entender que existen las ondas electromagnéticas, que la luz es una de ellas y que todas estas ondas viajan con la misma velocidad en el vacío; con todas estas observaciones abrió el camino para la invención poco tiempo después del radio y las radiocomunicaciones y para la creación de una nueva teoría de la óptica, la *óptica física.* Por todo esto y otros resultados muy importantes, a Maxwell se le considera justamente una de las grandes luminarias de la física. La teoría electromagnética nos muestra en forma concluyente que una onda electromagnética no existe en reposo. Pero sobre estas cosas hablaremos más adelante.

UNA RESPUESTA AÚN MÁS ORIGINAL

Regresemos ahora al problema que se planteaba el joven, quien se preguntaba qué pasaría si suponemos —como es lícito hacer según la mecánica de Newton— que corremos lado a lado de un haz luminoso con la velocidad de la luz. Como el joven había estudiado física — y, además, le entusiasmaba—, se dio la respuesta de inmediato:

—Simplemente esto es imposible. Si fuera posible vería luz en reposo; pero la luz en reposo no existe. Luego no lo puede hacer. Pero entonces aquí hay un problema, ¡y de los de verdad! La mecánica me dice que puedo moverme a la velocidad que yo quiera; la teoría electromagnética me dice que no puedo correr junto con un rayo de luz. Luego ¡hay una contradicción entre la mecánica de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell!

Con este sencillo pero profundo razonamiento nuestro joven había llegado a una conclusión asombrosa; las dos teorías más importantes que la física del siglo XIX conocía, las dos teorías más importantes de toda la física clásica, ¡estaban en mutua contradicción! O una o la otra era correcta, o tal vez ninguna de las dos; pero no podían serlo las dos.

Lo que tenía que concluirse de tan simple razonamiento era que algo fundamental en el núcleo mismo de la física estaba mal. ¿Y qué se nos ocurriría si ahora agregamos, como para dramatizar aún más, que nuestro inquisitivo joven se planteaba por sí y para sí mismo esta interrogativa y llegaba a estas conclusiones cuando tenía no más de 16 años y que alrededor de diez años después, de este embrión teórico habría de surgir la primera gran revolución de la física del siglo xx: la teoría de la relatividad?

La pequeña anécdota que acabamos de contar ha sido tomada de la vida real. Ya muy cerca del final de su vida, Albert Einstein narró cómo, a fines de 1895 o tal vez principios de 1896, cuando vivía como huésped en casa de uno de sus profesores suizos —Jost Winteler, por quien Einstein tuvo un sincero afecto— en la pequeña ciudad de Aarau, se le ocurrió esta idea, hasta la que él trazaba el origen de la teoría de la relatividad. Einstein aprovechó la oportunidad para añadir un comentario de profundo significado filosófico: "La invención no es producto del pensamiento lógico, aun si el producto final está indisolublemente unido a una estructura lógica." La observación invita a hacer una digresión, pero como ello nos llevaría muy fuera de nuestro tema, la dejamos para otra oportunidad.

LOS EXPERIMENTOS PENSADOS

El método seguido por el joven Einstein para descubrir la inconsistencia entre las teorías clásicas de la mecánica y el electromagnetismo puede parecer un tanto sorprendente a algún lector. ¿Cómo puede tomarse en serio un argumento que parte de suponer cosas tales como un individuo corriendo a la velocidad de la luz y similares disparates? Cualquier cosa que se concluya de ahí no tiene sentido. ¡Así de simple! Esta argumentación es errónea; se está construyendo lo que se llama *un experimento pensado,* es decir, un tren de pensamiento *lógico y consistente* en principio con las leyes de la física, que nos permite entender mejor un problema o alcanzar una conclusión firme, independientemente del hecho, meramente circunstancial e irrelevante, de si lo podemos llevar o no a efecto. En la vida real usamos a veces este tipo de experimentos pensados. Por ejemplo, cuando empezamos un argumento diciendo: "Supón que nos sacáramos la lotería y usáramos el premio para visitar Japón. Entonces podríamos ver que..." Lo más probable es que ni siquiera hayamos comprado billete para la lotería, y aunque lo tuviéramos, que tal vez ni a reintegro lleguemos; sin embargo, el argumento no por ello pierde su valor lógico y si nos sirve para

aclarar las ideas, es legítimo su uso. Estos experimentos pensados que en la jerga de los físicos son con frecuencia llamados *gedankenexperiment* son de uso muy frecuente en la física teórica por su utilidad como mecanismo de razonamiento. Einstein en particular fue autor de varios muy conocidos; el que hemos usado en nuestra anécdota fue tal vez el primero que inventó y muchos otros fundadores de la física a partir de Galileo han recurrido a ellos para construir sus argumentos.

Einstein publicó su primer trabajo sobre la teoría de la relatividad en 1905; tenía entonces 26 años. Había terminado algunos años antes sus estudios de física en la Escuela Superior Técnica Federal de Zurich (conocida usualmente por sus siglas alemanas como ETH) y unas semanas antes había obtenido su doctorado (con un trabajo del que tendremos mucho que decir más adelante); vivía en Berna, casado con la joven matemática servia Mileva Maric; había renunciado a la ciudadanía alemana para adoptar la suiza y trabajaba, no en la Universidad, sino como experto técnico de tercera clase en la oficina de patentes en Berna. Habían pasado diez años desde su observación inicial de la existencia de contradicciones internas dentro de la física clásica y ahora presentaba una solución a ellas, inesperada y radical ¿Qué hacía este joven alemán estudianto en Suiza, interesado en la física, pero trabajando de técnico en una oficina de patentes y no enseñando en la universidad; portador de una ciudadanía que no era la suya? ¿Y qué importancia e interés podían tener estos problemas de física que le inquietaban y que empezaba a revolucionar con su singular talento, su incomparable intuición física y su poderosa capacidad de análisis lógico? Tratemos de acercarnos a todo esto poco a poco, empezando por el principio.

LA FÍSICA CLÁSICA

Einstein realizó sus estudios en el Instituto Tecnológico de Zurich (el ETH) para obtener diploma como profesor de física entre 1896 y 1900. El diploma le fue otorgado a fines de julio de 1900; más adelante tendremos oportunidad de ver qué cosas importantes para Einstein ocurrían en la física precisamente en esas fechas. Incidentalmente, es común oír decir que Einstein fue un mal estudiante; las calificaciones que acompañan al diploma muestran lo contrario.[2] Por haber completado sus estudios durante el siglo XIX, su formación quedó estrictamente dentro de lo que se llama la *física clásica.*

La física clásica es, a grandes rasgos, la que se elaboró hasta el siglo pasado. Claro está que aún hoy puede hacerse, y de hecho se hace, física que por su temática o por sus métodos es clásica. La razón de esta clasificación no tiene que ver con el calendario, sino que consiste en que, precisamente con el siglo XX, comenzaron a surgir las teorías físicas contemporáneas, las que por su carácter representan una visión nueva del mundo físico, no sólo no contemplada dentro de la física clásica, sino que se salen de su marco y, en alguna forma que habrá que calificar en el momento oportuno, la superan. La clasificación es obviamente arbitraria, pero nos vamos a apegar a ella. Sin embargo, también conviene advertir que para muchos autores la teoría de la relatividad es ya parte de la física clásica, reservándose el término de física moderna a la mecánica cuántica —de la que hablaremos más adelante— y las teorías vinculadas con ella, como son la física atómica, la nuclear, la de partículas elementales, etcétera.

La física clásica consta de las siguientes especialidades, en términos generales. El soporte básico, la teoría clásica más fundamental, es la mecánica clásica o mecánica newtoniana; la mecánica newtoniana a su vez consta de grandes ramas, como la mecánica de las partículas (cuerpos que por alguna razón podemos describir como puntitos en movimiento), la mecánica del cuerpo rígido (como el trompo, el giroscopio, un bat, etc.), la mecánica de los fluidos, que da origen a la hidrodinámica y temas afines (que estudian el comportamiento físico de líquidos y gases); la teoría de la elasticidad, o de cuerpos deformables, etc. Estas ramas a su vez con frecuencia dan lugar al desarrollo de importantes especialidades aplicadas, como la mecánica celeste, la acústica o muchas otras de la ingeniería. Además de la mecánica y sus derivaciones, la física clásica consta de la termodinámica (que en forma sencilla podemos definir como la teoría del calor y sus efectos), la óptica (estudio de los fenómenos luminosos) y, finalmente, la teoría de la electricidad y el magnetismo, o, más brevemente, teoría electromagnética.

LA MECÁNICA CLÁSICA

La más antigua de las ramas de la física clásica es la mecánica, aunque conocimientos sueltos de hidrostática, etc., se puedan trazar hasta la civilizaciones antiguas (quizá el ejemplo que primero se viene a la mente sea el de los griegos y muy en particular, Arquímedes y su conocida ley de flotación.

La mecánica clásica comenzó a tomar su forma actual a partir de la intervención de Galileo Galilei (1564-1642), quien la despojó del carácter especulativo que le había impreso la escolástica aristotélica (deformando con ello la esencia misma de las enseñanzas aristotélicas originales), para transformarla en una *ciencia experimental.* Tan importante es la obra de Galileo al respecto, que con sus estudios de mecánica no sólo desarrolló muy considerablemente esta ciencia, sino que estableció un método general para conocer la naturaleza, el comúnmente llamado *método científico*. Este método, en el caso de Galileo, consistía, en lo esencial, en la exigencia de recurrir directamente, al experimento para obtener respuestas *preferiblemente cuantitativas* a las interrogantes planteadas, en vez de contentarse con consultar lo que al respecto había dicho Aristóteles, o alguno de sus intérpretes medievales. En forma alguna debe considerarse a Galileo como el primero o el único que en su época concibiera la necesidad de recurrir al experimento en vez de al dogma aristotélico para averiguar la verdad. —Baste recordar que enseñanzas similares ya las había propuesto el pensador inglés Roger Bacon *(circa* 1214-*circa* 1294) más de tres siglos antes—. Simplemente, Galileo fue el primer físico que recurre a él *sistemáticamente* como método para *construir* las teorías físicas. Por ejemplo —un tanto análogo a lo que hemos referido respecto de Einstein— a los 17 años hizo su primera observación física importante, a la que desde el momento inicial le dio un contenido cuantitativo: el periodo de un péndulo es el mismo, cualquiera que sea la amplitud de la oscilación. 3 (Años más tarde el astrónomo y físico holandés Christiaan Huygens (1629-1695) usó este principio para construir el reloj de péndulo). Su interés en la *observación* como fuente del conocimiento lo condujo a la construcción y uso a fondo del telescopio, lo que le permitió realizar un sinnúmero de descubrimientos de gran trascendencia para el desarrollo de la astronomía y la mecánica y, en particular, para el establecimiento definitivo del modelo de Copérnico del Sistema Solar.

El día de Navidad del año en que murió Galileo, nació Newton. Isaac Newton (1642-1727) transformo la mecánica rudimentaria de su época en moderna mecánica clásica, no sólo descubriendo y sistematizando sus leyes fundamentales (en las tres leyes de Newton), sino inventando simultáneamente las matemáticas necesarias para expresar y usar estas leyes. Newton realizó su magistral proeza intelectual recién egresado de la universidad a los 25 años de edad y retirado del mundo académico en la finca campestre de la madre, donde se había acogido huyendo de la peste que asolaba Londres aquellos años. Ya hemos mencionado cómo una situación análoga se dio también en el caso de Einstein. De hecho, entre estas dos grandes figuras hay notables paralelismos.

Newton realizó una síntesis teórica de singular valor al demostrar que las leyes de la mecánica que rigen el movimiento de ls cuerpos en el laboratorio, son las mismas que controlan el movimiento de los planetas alrededor del Sol; algo así como decir que la mecánica del cielo es la misma que la de la Tierra. Parece increíble que leyes tan simples como las formuladas por Newton puedan a la vez describir el comportamiento de una pequeña piedrecita y el del gigantesco Júpiter y sus satélites. Este quizá sea el primer ejemplo conocido por la ciencia, y seguramente el más impresionante, de la profunda unidad que reina en la naturaleza, dentro de su inagotable diversidad. Fue, precisamente esta universalidad de las leyes de la mecánica lo que le permitió a Newton, partiendo de los resultados de Kepler y Galileo sobre el movimiento de los planetas y satélites en el Sistema Solar, formular la ley universal de la gravitación, la que reinó absoluta y soberana hasta 1915, cuando, llevado por una convicción profunda, Einstein formulara su teoría general de la relatividad, que de hecho es una teoría de la gravitación. Ya tendremos oportunidad de hablar un poco de esto, y de la conmoción que el nuevo descubrimiento causara en su época.

A partir de Newton, usando y desarrollando sus métodos y sus teorías, la mecánica evolucionó

aceleradamente; los frutos que se cosecharon de este esfuerzo fueron inmensos y repercutieron fuertemente en toda la física, las matemáticas, la química, la ingeniería e incluso la filosofía.4 En la actualidad, para los problemas mecánicos de la vida cotidiana y de la ingeniería sigue siendo la teoría física fundamental.

LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

Los fenómenos eléctricos y algunos fenómenos magnéticos fueron conocidos desde la antigüedad. Tal vez pueda decirse que el conocimiento moderno de los fenómenos electromagnéticos se inició cuando Alessandro Volta (famoso físico italiano, 1745-1827) inventó la batería eléctrica y apiló varias de ellas (de donde viene la palabra *pila* con que las conocemos) para obtener mayores voltajes (término que deriva de su nombre).5 Pronto el químico inglés William Nicholson (1753-1815) demostró que era posible observar el efecto complementario: Volta producía electricidad con reacciones químicas; él descompuso el agua en oxígeno e hidrógeno haciendo circular una corriente eléctrica por ella.

Atraído por estos resultados, el joven y gran químico inglés Humphry Davy (1778-1829) pronto construyó grandes pilas de Volta (con centenares de elementos) que le permitieron aislar un gran número de elementos químicos (calcio, sodio, potasio, magnesio, etc.), a partir de compuestos como la soda, la potasa, etc. Metido a electricista, Davy se siguió de frente y terminó por inventar la lámpara de arco, que fue la primera aplicación que ponía en evidencia el potencial práctico cotidiano de las corrientes eléctricas. Pero se considera que su mayor descubrimiento fue el joven Faraday, encuadernador que un día asistió a una de sus famosas conferencias públicas y le solicitó empleo, y al que tomó como ayudante y aprendiz. En pocos años el exencuadernador Michael Faraday (1791-1867) vendría a revolucionar con sus inventos y descubrimientos el conocimiento electromagnético de la época y a convertirse en el director del laboratorio del Instituto Real y con el tiempo en profesor de química y miembro de la Real Sociedad de Londres, máximos honores a los que podría aspirar un científico inglés.6 Inspirado en las ideas y concepciones de Faraday, Maxwell produjo poco tiempo después la teoría electromagnética prácticamente en la forma en que hoy la conocemos.

Maxwell (1831-1879) murió prematuramente de cáncer el año en que naciera Einstein. Pese a la brevedad de su vida, legó una obra impresionante, que lo coloca entre los más eminentes científicos que ha dado la humanidad. Inicialmente Maxwell dirigió su atención a lo que hoy llamamos teoría cinética de los gases. Maxwell —y paralela e independientemente el físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906)— concibió un gas como formado por moléculas que se mueven independientemente, rebotando en las paredes del recipiente y, en ocasiones chocando entre sí. De este modelo Maxwell pudo deducir las leyes de los gases que forman parte de la termodinámica (ciencia de origen experimental) y demostrar definitivamente que el calor no es un fluido, sino una forma de movimiento, como habían supuesto Mijail Lomonosov (químico, historiador y escritor ruso, (1711-1765) y Benjamín Thompson, mejor conocido como conde de Rumford (físico norteamericano-inglés, (1753-1814), entre otros. Incidentalmente, fue Rumford quien contrató a Davy como conferencista de la Real Institución 7

Sin embargo, el trabajo de mayor importancia de Maxwell es el referente a la teoría electromagnética. Inspirado en los trabajos de Ampère (las corrientes eléctricas producen fuerzas mecánicas), Oersted (las corrientes eléctricas producen efectos magnéticos), y, especialmente, los resultados y concepciones de Faraday, Maxwell concluyó que era necesario corregir parte de las leyes conocidas de la electricidad, agregando una forma desconocida hasta entonces de corriente eléctrica (que es, por ejemplo, la que circula

en el aislante de un condensador y lo carga). Este descubrimiento le permitió dar a las leyes de la electricidad y el magnetismo una forma muy condensada y general (las llamadas ecuaciones de Maxwell) que permite describir, en principio, todos los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Dotado de este bagaje teórico, Maxwell pudo demostrar que electricidad y magnetismo van siempre juntos: cambios eléctricos producen fenómenos magnéticos y viceversa. Por ejemplo, cuando giramos un imán, circula una corriente por un conductor cercano a él (éste es el principio con que funcionan los generadores de electricidad). Pero más importante aún, demostró con sus ecuaciones que un oscilador eléctrico (el análogo eléctrico del péndulo mecánico) radia ondas electromagnéticas, y que estas ondas tienen precisamente la velocidad de la luz. De aquí infirió que la luz es una onda electromagnética (ya se sabía que la luz es una onda, pero no *onda de qué*) y que debería ser posible obtener ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, y no sólo las visibles, o cercanas como infrarrojas o ultravioletas. Algunos años más tarde, en 1888, Heinrich Hertz (ingeniero y físico alemán, (1857-1894) pudo generar y detectar estas ondas en el laboratorio. Poco después, Alexander Popov (físico ruso, 1859-1905) introdujo la antena como medio de enviar y recibir estas ondas hertzianas y Guglielmo Marconi (acaudalado ingeniero e inventor italiano, 1874-1937) inventó métodos para usarlas comercialmente y realizó la primera comunicación por radio (es decir, radiotelegráfica) intercontinental en 1901: de aquí emergieron las modernas radiocomunicaciones, partiendo de la introducción en 1904 del primer bulbo electrónico por el ingeniero norteamericano Lee de Forest (1873-1961). Hoy sabemos que las ondas de radio, las infrarrojas, las visibles, las ultravioleta, las microondas, los rayos x, los rayos gamma, etc., no son todos ellos sino ondas electromagnéticas que difieren entre sí sólo por su frecuencia y longitud de onda (es decir, cuántas se dan por segundo y cuánto mide cada una).

ÉTER, ACCIÓN A DISTANCIA Y CAMPOS

Maxwell tomó de Faraday la idea de que alrededor de un cuerpo electrificado hay un fenómeno eléctrico, que representaba mediante *líneas de fuerza eléctrica.* Esto quiere decir que el espacio alrededor de este cuerpo *contiene*fenómenos eléctricos. A esta imagen se refiere uno cuando habla de *campo eléctrico.* Análogamente, podemos hablar de un campo magnético o, más en general, de un campo electromagnético. Quizá la forma más simple de explicar estos conceptos, que no son del todo simples, es recurriendo al ejemplo gravitatorio.

Consideremos el caso del Sol y la Tierra; decimos que el Sol atrae a la Tierra y la mantiene en su órbita secular. Pero ¿cómo es posible que el Sol, estando tan lejos de la Tierra, ejerza una acción sobre ella? En la época de Newton, y hasta entrado el siglo XIX, se pensaba en términos directos: hay una acción a distancia que no requiere intermediarios. Es claro que esto no es sino la constatación de un hecho observado, y no una explicación. O bien, que si se toma como explicación, deja la sensación de que algo mágico o misterioso está atrás de todo esto. Parece que la intuición falla y se siente que, en el fondo, se carece de explicación.

Pero podemos pensar *a la Faraday.* El Sol produce a su alrededor un fenómeno gravitatorio real, físico, que denominamos `campo gravitatorio del Sol:` esto significa que el espacio alrededor del Sol tiene diferentes propiedades físicas si hay Sol que si no lo hay. Al colocar a la Tierra cerca del Sol, ella queda en contacto directo con este campo y responde tratando de acercarse al Sol: ésta es la atracción gravitatoria. Así, desaparece la acción a distancia para quedar sustituida por una *acción directa,* no entre los cuerpos, sino entre ellos y el campo que sirve de intermediario. Podemos hacernos una imagen aún más gráfica de esta descripción recordando una vez más el experimento del imán y las limaduras de hierro: las limaduras se distribuyen a lo largo de las *líneas de fuerza* del *campo magnético* creado por el imán.

Podemos extender estas ideas al caso de las cargas eléctricas, de las que hay positivas y negativas (equivalentes a los polos norte y sur del imán) y hablar así de un campo *electrostático.* Si las cargas se movieran, como sucede cuando se produce una corriente eléctrica, podríamos seguir usando esta misma imagen, sólo que ahora las líneas de fuerza y el campo eléctrico respectivo estarían en movimiento. Está claro que la idea de campo se puede extender naturalmente al caso electromagnético, nada más que ahora

conviven en el mismo espacio un campo eléctrico y otro magnético en constante transformación (y podría haber en el *mismo* espacio otros campos, como gravitatorios, etc.).

Pero es más fácil aún entender al campo electromagnético como un ente físico si suponemos que el espacio está lleno de un material muy tenue y que los fenómenos electromagnéticos no son sino perturbaciones de él. Así, por ejemplo la luz sería un disturbio vibratorio que se propaga en este medio universal, en forma análoga a como el sonido es una perturbación mecánica vibratoria en el aire. A este hipotético medio, asiento de los fenómenos y de los campos electromagnéticos, se le llamó éter 8 . La idea del éter surgió como una necesidad teórica aparentemente inevitable cuando se entendió que la luz es un fenómeno ondulatorio *(algo* tenía que estar ondulado): de hecho, fue adoptada por Augustin Fresnel (físico francés que construyó la teoría matemática de las ondas luminosas, 1788-1827) y demás físicos que proponían la teoría ondulatoria de la luz. La primera teoría del éter fue desarrollada por el gran matemático francés Augustin (barón de) Cauchy (1789-1857), y extendida por otros investigadores, incluyendo al propio Maxwell.

Maxwell vio en el éter la manera más natural de deshacerse de toda acción a distancia y de extender a todas las ondas electromagnéticas lo que se suponía era válido para el caso particular de la luz. Pero había problemas, pues el éter debía concebirse como una sustancia con propiedades muy singulares. Por un lado, debía ser tan tenue, ligero y transparente a la luz visible y, simultáneamente, a los cuerpos celestes, como para que podamos haber estado considerando durante siglos al espacio como vacío, es decir, como carente de todo medio material. Por otro lado, debía ser capaz de servir como asiento a las ondas electromagnéticas, lo que demanda de él una notable rigidez y otras propiedades no menos sorprendentes y contradictorias y más afines con la noción de sólido que de fluido ultratenue. Pese a estas dificultades, la idea del éter se abrió camino y para fines del siglo pasado se consideraba al éter como una realidad física. Como tendremos oportunidad de ver más adelante, incluso se realizaron experimentos extraordinariamente delicados para detectar el movimiento de la Tierra a través del éter.

TIEMPO Y ESPACIO ABSOLUTOS

Vale la pena aprovechar la oportunidad para mencionar otro aspecto del problema del éter, conectado esta vez con la mecánica. La mecánica de Newton contempla —es decir, postula—un espacio y un tiempo absolutos. El primero es algo así como la arena en que ocurren los fenómenos físicos y el segundo deviene, fluye por sí mismo, independientemente de cualquier acontecer. El espacio está dado y metemos en él los objetos físicos: el espacio es la casa en la que metemos los muebles, que son las cosas y los objetos que pueblan el mundo físico. Y estos muebles y estas cosas, se mueven y cambian conforme el tiempo transcurre (y es tarea de la mecánica decir cómo y por qué se mueven): pero el tiempo transcurre aunque las cosas no se muevan. Esta es la imagen newtoniana.

Desde el punto de vista absoluto en que se coloca la física clásica, tiene sentido hablar de la *velocidad de un móvil,* pero debe distinguirse la *velocidad absoluta,* medida respecto al espacio absoluto y fijo, de la *velocidad relativa,* medida respecto a otro cuerpo en el espacio. Como este último puede estar en movimiento respecto al espacio, las dos velocidades pueden ser diferentes. Por ejemplo, podemos hablar de la velocidad de la Tierra respecto del Sol $\boldsymbol{V}_{TS}$ (que es claramente una velocidad relativa); pero para conocer la velocidad absoluta de la Tierra $\boldsymbol{V_t}$ —es decir, cómo se mueve la Tierra realmente en el espacio—, debemos agregarle a la primera ($\boldsymbol{V}_{TS}$), la velocidad absoluta del Sol en el espacio $\boldsymbol{V_S}$, de tal manera que tendremos que

$$\boldsymbol{V_T = V_{TS} + V_S} \qquad \textbf{(1)}$$

Esta sencilla fórmula la podríamos también escribir en la forma siguiente:

$$V_{TS} = V_T - V_S$$

Lo interesante de esta última expresión es que nos dice que las velocidades relativas son la diferencia entre dos velocidades absolutas. Surge así el interés en determinar las velocidades absolutas de los cuerpos celestes y en otros casos.

El punto en conexión con la discusión anterior está en que la suposición natural es que el éter se encuentra en reposo en el espacio; luego las velocidades absolutas se miden respecto del éter. Regresemos ahora a la luz. Cuando la luz viaja con una velocidad *c* igual a trescientos mil km/s, queremos decir que la luz viaja (se propaga) a través del éter con la velocidad *c.* Pero como la Tierra se mueve respecto del éter con velocidad V_T, aplicando la fórmula (1) a este caso (con el cambio adecuado de algunas literales), obtendríamos que si luz y Tierra vienen al encuentro, la velocidad de la luz respecto de la Tierra sería

$$C_T' = c + V_T' \qquad \textbf{(2)}$$

Si, por lo contrario, la Tierra se moviera como si se alejara del haz de luz, la velocidad de la luz que pasa sería

$$C_{T''} = c - V_T \qquad \textbf{(3)}$$

Claro está que si la luz no llega a la Tierra en ninguna de las dos direcciones opuestas que hemos supuesto, sino que hace algún ángulo intermedio, obtendríamos algún resultado intermedio entre las dos velocidades C_T' y C_T''

Pero éste es un punto de poco interés para nuestra discusión. Si ahora restamos la fórmula (3) de la (2) vemos que

$$C_T' \; C_T'' = 2 \; V_T \qquad \textbf{(4)}$$

Éste es también un resultado interesante: si medimos la velocidad con que la luz se mueve cuando viaja en la dirección contraria al movimiento de la Tierra en el espacio y le restamos la velocidad con que la luz nos llega cuando viaja en la dirección en que se mueve la Tierra, el resultado es el doble de la velocidad absoluta con que la Tierra se mueve en el espacio. ¡Luego midiendo la velocidad de la luz podemos determinar la velocidad absoluta de la Tierra en el espacio! Y conociendo la velocidad absoluta de la Tierra podremos determinar las velocidades absolutas de los cuerpos celesfes midiendo cómo ellos se mueven respecto a nosotros y aplicando una fórmula como la (1): ¡Todo un programa de trabajo para la física newtoniana!

¿Y por qué no se ha llevado a cabo este interesante programa? La respuesta es simple: los primeros pasos se dieron hace cosa de cien años, cuando el físico norteamericano Albert Michelson (1852-1931) diseñó un instrumento capaz de detectar esta diferencia de velocidades de la luz (en realidad, empleando un método un poco diferente a lo expuesto, pero la idea es la misma) y con la posterior ayuda de Edward Morley (químico norteamericano, 1838-1923) se puso manos a la obra. El experimento falló y en esta falla

reside su éxito y su fama, como ya tendremos oportunidad de ver en el próximo capítulo. Por el momento baste decir que la explicación del fracaso reside en el hecho de que las *ideas* que acabamos de exponer no son correctas. Pero esto no se sabía cuando se hicieron los experimentos y vino a quedar claro hasta que la irrupción de Einstein en la física le diera un vuelco a la concepción de espacio y tiempo absolutos.

EL JOVEN EINSTEIN

Parece que ha llegado el momento de empezar a hablar de Einsten. Albert Einstein nació el 14 de marzo de 1879 en la , ciudad alemana de Ulm. Maja (María), la hermana (única) con la que mantuviera muy estrechas relaciones, toda la vida, era dos años y medio menor. Hijos de un matrimonio judío no profesante y con actitud asimilacionista, ambos recibieron nombre no judío. El padre Hermann Einstein (1847-1902), un respetado y bonachón comerciante de actitudes liberales, inculcó en los dos hijos amor a la literatura; la madre, Pauline Koch (1858-1920), dedicada al hogar, mujer con talento musical, cultivó aficiones musicales en los hijos. Einstein estudió varios años el violín, hasta la edad de trece años (y no sin dejar de protestar); más tarde, aprendió por sí mismo un poco de piano; frecuentemente, madre e hijos se acompañaban en la interpretación de música clásica. Su prima Elsa —quien décadas más tarde se convertiría en su segunda esposa— se enamoró del pequeño Alberto por el sentimiento con que interpretaba a Mozart. En notas autobiográficas que Einstein se viera precisado a escribir ya cerca del final de su vida, nos cuenta de su primera experiencia con la física, cuando teniendo 4-5 años de edad, su padre le mostró una brújula, instrumento que le produjo una profunda impresión. Contaba: "Tenía que haber algo atrás de los objetos, muy en lo profundo..." En las mismas notas nos narra otra experiencia importante, ocurrida a los doce años de edad, cuando le regalaron un libro de geometría: "La claridad y certeza de la explicación produjeron en mí una impresión indescriptible", nos dice.

La familia se había trasladado a Munich desde 1880, en donde el pequeño Alberto realizó con excelentes resultados su escuela elemental. En octubre de 1888 ingresó al Gimnasio Luitpold (escuela secundaria), en donde encontró un clima a la vez sumiso y autoritario y una enseñanza acartonada que le disgustó profundamente. Fue esta escuela, sin embargo, la que produjo en Einstein su única experiencia religiosa: las clases de religión lograron provocar en él una apasionada reacción mística, aunque de corta duración. Durante el año que duró esta pasión, llegó a componer canciones en honor a Dios, pero pronto su continuado contacto con los libros de ciencia terminó con el arrebato místico. Un joven estudiante de medicina amigo de la familia, Max Talmut (posteriormente Talmev) da a conocer al pequeño Albert muchos libros de física y de filosofía, incluyendo a Kant, y discute largamente con él estas lecturas. Posteriormente, durante el resto de los años en el Gimnasio, Albert estudia ciencias y, sobre todo, matemáticas superiores, en forma autodidacta.

Por necesidades de la pequeña fábrica familiar (de instrumental electrotécnico, establecida en sociedad con el tío Jakob Einstein), la familia se muda en 1894 a Milán y poco después a Pavía. Albert se queda solo en Munich, para terminar una escuela que le disgusta sobremanera. Pero se cierne un peligro: el servicio militar, idea que le repugna. La solución la encuentra en la propia ley: si sale de Alemania antes de cumplir los 17 años no está obligado a regresar a cumplir con el servicio militar. El joven Einstein se consigue como puede cualquier certificado del gimnasio y otro de algún médico amigo en el que se consignan desórdenes nerviosos, y se reúne con la familia en Pavía. Naturalmente, cuando presenta sus exámenes de admisión al ETH en octubre de 1895, no los pasa, debido a las materias de humanidades. Decidido a renunciar a su ciudadanía alemana, el joven Albert parte para Aarau, pequeña ciudad de la Suiza alemana, equidistante de Basilea, Lucerna y Zurich, para obtener la *matura*, es decir, el equivalente a nuestra preparatoria, que le permitirá ingresar al tecnológico de Zurich.

En Aarau el joven encuentra por vez primera una escuela que le atrae, debido a la actitud liberal y natural de los profesores quienes no recurrían a métodos autoritarios para hacer valer sus enseñanzas. Es durante esta breve estancia Aarau cuando el joven Einstein percibe los indicios de la existencia de serias dificultades de consistencia entre la mecánica y la teoría electromagnética según hemos narrado. A principios de 1896 obtiene el certificado de haber renunciado a la ciudadanía alemana y meses después, habiendo obtenido la *matura*, se traslada a Zurich e inicia sus estudios de física y matemáticas en el ETH.

Durante todos estos años recibe una modesta pensión familiar. En esta época establece varias relaciones de importancia en su vida; en particular, conoce a Mileva Maric, compañera de estudios de matemáticas en el ETH y su futura esposa, y a Michele Angelo Besso (Zurich, 1873; Ginebra, 1955) con quien trabaría una amistad que se extendió por toda la vida. De Besso alguna vez Einstein escribió que era la persona más inteligente que tuvo oportunidad de conocer; desempeñó un papel muy importante en la vida de Einstein, como escucha y crítico de sus ideas. 9

Durante su estancia en el ETH, Einstein se interesó más en los laboratorios que en los cursos teóricos los que llegó a desatender; de hecho, los estudios teóricos los realizaba más bien en forma autodidacta, recurriendo a los trabajos originales de Kirchhoff, Helmholtz, Boltzmann, Lorentz, etc. En julio de 1900 Einstein obtuvo su diploma del ETH; sin embargo, no obtuvo un puesto de asistente en el mismo Instituto, mientras que sus otros tres compañeros de generación lo obtienen de inmediato. Sus esfuerzos por encontrar trabajo como físico —escribe cartas a grandes figuras de su época, como al fisicoquímico ruso-alemán Friedrich Ostwald (1853-1932) y al gran físico experimental holandés Kaamerlingh Onnes, fundador de la física de bajas temperaturas— no dan frutos, lo que le crea un grave problema, pues la situación económica de la familia se había deteriorado considerablemente en los últimos años y él no puede seguir siendo una carga familiar. Sin embargo, pese a estas dificultades, en diciembre de 1900 envía a publicar su primer trabajo de investigación a la revista alemana especializada en física *Annalen der Physik,* que es la misma que pronto habría de convertirse en el vehículo de comunicación de Einstein con el resto de los físicos del mundo y desde la cual habría de revolucionar la física de su época.

A principios de 1901 Einstein recibe la ciudadanía suiza (la que mantuvo por el resto de su vida, aunque más tarde adquiriera también la norteamericana), pagando los gastos con ahorros de varios años de parquedad; además, se las arregla para quedar exento del servicio militar por pies planos y venas varicosas —lo que muestra que en ocasiones los pies planos pueden ser útiles—. En mayo de ese año obtiene un puesto de profesor sustituto por dos meses en una escuela secundaria de la ciudad de Winterthur, no muy lejos de Zurich. Este trabajo le permite observar que su interés en la investigación científica no decae por el hecho de no estar conectado con una universidad, por lo que decide aceptar cualquier tipo de empleo. Empieza sus trabajos de investigación sobre la teoría cinética de gases, asunto al que regresaremos en el próximo capítulo. Poco después, una escuela privada de la ciudad de Schaffhausen, muy cerca de la frontera alemana, lo contrata por un año. Escribe un trabajo que presenta a la Universidad de Zurich como tesis doctoral, pero no es admitido como tal y Einstein tiene que contentarse con publicarlo en el *Annalen der Physik* (aparece en 1902). Su compañero de estudios, gran amigo y posterior colaborador científico Marcel Grossmann había recomendado a Einstein con su padre; de las gestiones de este último el joven obtuvo finalmente la promesa de un puesto como técnico en la Oficina de Patentes de la ciudad de Berna. Con esta perspectiva a la vista, Einstein se trasladó a la capital de Suiza en febrero de 1902; como el puesto lo obtuvo hasta mediados de junio, durante la espera se ganó la vida impartiendo clases privadas de física, anunciándose en los diarios de la ciudad y ofreciendo una hora de prueba gratis.

Entre los pocos que se aproximaron al novel profesor para prepararse se encontraba el joven estudiante (de filosofía y de todo) rumano Maurice Solovine (1875-1958),con quien de inmediato trabó una amistad que perduró por el resto de sus vidas. Junto con un tercer amigo, el estudiante de matemáticas Konrad Habicht, Einstein y Solovine acostumbraron reunirse regularmente para discutir problemas de física, filosofía e incluso literatura. Acordaron fundar lo que llamaron la Academia Olimpia, con ellos tres como miembros únicos; las sesiones ocurrían normalmente en el departamento de Einstein y se continuaron durante dos años, aproximadamente. En estas reuniones, que tomaba muy en serio, Einstein continuó con su lectura de filósofos como Spinoza, Hume y Mach —de quien apreciaba mucho su profundo sentido crítico— y conoció parte de la obra del gran matemático y filósofo positivista francés Henri Poincaré (1854-1912); en particular leyó y apreció mucho el libro *Ciencia e hipótesis*, primero de una serie que Poincaré publicara recogiendo sus ensayos sobre filosofía y fundamentos de la ciencia y que continúan siendo lectura regular en algunos círculos.

El padre de Einstein tuvo serios problemas de salud; el joven fue a Milán y aprovechó la ocasión para insistir en obtener autorización para casarse con su excompañera de estudios Mileva, matrimonio al cual los padres se oponían. Al final, el padre aceptó y la madre se resignó. Hermann Einstein murió en octubre. En varias ocasiones Einstein escribió que la muerte de su padre fue el golpe personal más grave de toda su vida; durante una temporada desarrolló un profundo sentimiento de culpa, por su inutilidad para ayudar al padre. Los jóvenes se casaron el 16 de enero de 1903. Con Mileva Maric (Titel, hoy Yugoslavia, 1875-Zurich, 1948) Einstein procreó dos hijos, Hans Albert (Berna, 1904-Berkeley, Cal., 1973) y Eduard (Zurich, 1910-Zurich, 1965); el primero fue doctor en ingeniería, egresado del ETH y más tarde profesor en la Universidad de Berkeley; el segundo gustó de la música pero no terminó sus estudios y paso sus últimos años en un hospital psiquiátrico, donde murió.

Einstein, joven de 23 años, radica en Berna, en donde finalmente ha obtenido el puesto de experto técnico de tercera clase, interino, a partir del 23 de junio de 1903 en la Oficina de Patentes. Calladamente, se ha iniciado la revolución de la física.

NOTAS

1 Nótese la diferencia con las ondas del sonido: sí es posible correr al lado del sonido y lograr que se quede junto a nosotros. Por ejemplo, un avión supersónico debe evitar que el sonido de sus motores se quede atrapado dentro del avión, pues se puede destruir por lo intenso de las vibraciones. Para esto, tiene que rebasar muy rápidamente la velocidad del sonido.

2 Las calificaciones finales que constan en el diploma, traducidas de la escala europea 0-6 (y que se dan entre paréntesis) a nuestra escala 0-l0 son: 9.2(5.5) en teoría de funciones; 8.1 (5) en los cursos de física teórica y física experimental, así como en astronomía; 7.5 (4.5) en el trabajo de diploma.

3 Un péndulo es simplemente un cuerpo pesado que oscila suspendido de un hilo o una barra rígida. El periodo (de oscilación) es el tiempo que necesita el péndulo para ir y venir una vez. La amplitud (de la oscilación) se mide por el ángulo máximo que el péndulo se desvía de la vertical, el que debe ser pequeño para que la afirmación del texto sea correcta (no más de 10-12 grados). El lector interesado puede fácilmente comprobar la observación de Galileo construyendo un péndulo con una tuerca pesada o algo similar suspendida de un hilo. Cambiando la longitud del hilo cambiará el periodo, pero no cambiará modificando el peso de la tuerca ni la amplitud de la oscilación.

4 La confianza que generaron los grandes éxitos terrestres y astronómicos de la mecánica newtoniana dio lugar al nacimiento de la doctrina filosófica del mecanicismo: esta es una visión puramente mecánica del mundo. Con el desarrollo ulterior de la física y la demostración de la existencia de fenómenos físicos no mecánicos, las razones que dieran sustento al mecanicismo desaparecieron.

5 El lector curioso puede hacer fácilmente una pila similar a las que construyó volta e investigadores posteriores como Davy, apilando placas de cinc, papel secante, cobre, cinc, papel secante, cobre..., impregnando el papel secante con una solución de sal. Cada grupo (cobre, solución salina, cinc) constituye una batería, y se han colocado varias de ellas en *pila*, es decir, en *serie.* Con alambres unidos a las placas externas de cobre y cinc puede encender un foquito (método moderno), o descomponer una solución ácida de agua (y ver los primeros efectos de la corriente eléctrica que la ciencia produjo).

6 El caso de Faraday merece comentario especial. Pese a su falta de escolaridad, su interés por la ciencia, despertado por la lectura de los libros que llevaban a encuadernar al taller donde trabajaba, fue tan intenso que aprovechó un boleto que le regalaron para asistir a una conferencia de Davy, muy prestigiado químico, y elaborar cuidadosas notas de ella, las que después de varias peripecias pudo hacer llegar a Davy, con la solicitud de empleo. La calidad de este trabajo hizo que Davy lo contratara un año después, con salario menor del que obtenía en el taller y a los 22 años de edad. Pronto el joven Faraday empezó a eclipsar al

maestro, lo que produjo una respuesta resentida y violenta por parte de Davy. En ese laboratorio, al que consagró el resto de su vida activa, Faraday continuó el trabajo de Davy y realizó magníficos descubrimientos e invenciones: fue el primero en licuar gases por presión; produjo temperaturas bajo cero (Fahrenheit); descubrió el benceno y desarrolló la electroquímica (suyos son los términos usuales de electrolito, electrólisis, electrodos, ánodo, cátodo etc.) descubriendo además la primera ley cuantitativa de la electroquímica (ley de Faraday). Dirigió después su atención a la corriente eléctrica e inventó primero el motor eléctrico, poco después el generador eléctrico (del que emergió más tarde toda la industria eléctrica) y el transformador de corriente alterna (sin entender aún bien a bien qué pasaba, pues el concepto de corriente alterna aún era desconocido) y descubrió el fenómeno de la inducción. Faraday concibió, finalmente, nociones fundamentales, como las de línea de fuerza y de campo magnético (algo como lo que vemos con limaduras de fierro espolvoreadas sobre un papel que cubre un imán) que fueron fundamentales para el trabajo posterior de Maxwell. Hombre modesto, sencillo y religioso, cuando el gobierno inglés en guerra con Rusia solicitó de él estudiar el problema de la posible producción de gases venenosos, Faraday se negó rotundamente.

7 Estos temas se discuten con más amplitud y profundidad en el libro de L. García-Colín citado en la bibliografía al final.

8 La palabra éter designaba en la obra de Aristóteles la sustancia de la cual están compuestos los cielos.

9 Besso y Einstein llegaron a establecer parentezco político. Cuando Einstein vivió en Aarau con los Winteler, su hermana Maja lo acompañó, el hijo menor de los Winteler, Paul se casó años después con Maja. Einstein presentó a Michele Besso con la hija mayor, ANNA, relación que terminó también en afortunado matrimonio.

II. LOS AÑOS EN BERNA

Realmente fueron hermosos aquellos

años en Berna.

A. EINSTEIN

EINSTEIN permaneció en Berna hasta finales de 1909: cuando salió de ahí para tomar su puesto de profesor asociado en la Universidad de Zurich, había ya escrito el trabajo en que propone que la luz tiene naturaleza cuántica y que le valiera el premio Nobel; participado decisivamente en la demostración definitiva de la estructura atómica de la materia y creado la mecánica estadística y la teoría del movimiento browniano; inventado la teoría especial de la relatividad e iniciado la construcción de la teoría general de la relatividad; además, había descubierto la que probablemente es la más famosa fórmula de la física contemporánea: $E= mc^2$ como el corrimiento de la luz hacia el rojo y fundando la teoría cuántica de los sólidos. Lleva entre sus papeles su primer doctorado *honoris causa* y antes de un año sería propuesto por primera vez para el premio Nobel. Cómo sucedió todo esto trataremos de contarlo en este capítulo.

Berna es una pequeña ciudad de carácter universitario, casi milenaria y hermosa. Einstein tuvo la fortuna de instalarse en el número 49 de la Kramgasse, de la que Goethe en sus *Viajes a Suiza* dijera que es la más bella calle de esta pulcra ciudad. El pequeño departamento en el último piso que ocuparan los Einstein es hoy museo y está abierto al público. En este departamentito vivió Einstein durante 1905, el *annus mirabilis*, no sólo de Einstein, sino de la física, el curso del cual le fue suficiente para ensanchar los horizontes de la física, como nunca nadie, antes o después de él pudo hacerlo en tan corto tiempo y a tal profundidad, con la única excepción de Newton.

Einstein permaneció en la Oficina de Patentes hasta finales de 1909, habiendo obtenido promoción a experto técnico de segunda clase en 1906. En febrero de 1908 probó suerte como profesor privado (es decir, pagado por sus alumnos) en la Universidad de Berna, mermando con ello su limitado tiempo libre para investigar. Finalmente logró el puesto antes mencionado en la Universidad de Zurich, en la que no permanecería por mucho tiempo. Es sumamente interesante conocer cómo obtuvo Einstein su primer puesto de profesor.

En 1908 la Universidad de Zurich decidió crear la cátedra de física teórica; entre los posibles candidatos a ocupar el correspondiente puesto de profesor asociado se encontraban Einstein y su excompañero de estudios en la ETH Friedrich Adler (1879-1960), hijo de Viktor Adler, uno de los fundadores del Partido Socialdemócrata austriaco. Por simpatías políticas —y sin demérito de Adler— el puesto se le ofreció a este último. Cuando el joven Adler se enteró que Einstein sí tendría interés en el puesto en un acto pleno de integridad y lealtad escribió una carta al Comité de Educación, en la que decía que: "Si es posible obtener una persona como Einstein para nuestra Universidad, es absurdo darme a mí el puesto. Debo decir francamente que mis habilidades como investigador en física no soportan la menor comparación con las de Einstein. Una oportunidad como la presente de conseguir una persona que nos puede beneficiar tanto, elevando el nivel general de la Universidad no debe perderse debido a simpatías políticas." Adler tuvo aún que insistir durante varios meses para lograr que Einstein fuera el seleccionado. La amistad duró toda la vida, pero no estuvo libre de dificultades. En 1916, en plena Guerra Mundial e impulsado por su profundo pacifismo, Adler mató en un atentado al Primer Ministro austriaco; Einstein se ofreció como testigo de descargo. Ésta fue una de las primeras intervenciones pacifistas públicas de Einstein, de las cuales habría muchas en su vida.

Retomemos el hilo inicial. Einstein se ha establecido en Berna, tiene una situación personal modesta pero estable; ha publicado un par de trabajos científicos y le bulle la cabeza con ideas e interrogantes sin

respuesta. Y llega 1905, año en que sucede todo como un milagro: en marzo escribe el trabajo de la cuantización de la luz y el efecto fotoeléctrico; en abril su tesis doctoral —que hoy en día, 80 años después, sigue siendo uno de sus trabajos más citados por su interés industrial— en mayo escribe su primer ensayo sobre la teoría del movimiento browniano; y, aunque parezca increíble, un mes después, en junio, envía a publicación el trabajo que da nacimiento a la teoría de la relatividad. Y en septiembre de este mismo año, Einstein expide el manuscrito que contiene la fórmula que relaciona la masa con la energía. En el ínterin, usa las vacaciones de verano para ir a Yugoslavia y conocer a la familia de su esposa. Revisaremos los trabajos de 1905 en su orden cronológico, para asomarnos a las teorías que propusiera Einstein en sus años en Berna.

LOS CORPÚSCULOS DE LUZ

El trabajo sobre la radiación electromagnética, en el que Einstein propone que la luz está constituida por corpúsculos, más conocido como el trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, tiene su origen en un viejo problema de la física teórica, al que el gran físico alemán Max Planck (1858-1947) había encontrado solución parcial en 1900, el año de la graduación de Einstein.

El problema en cuestión es el llamado de la *radiación de un cuerpo negro,* es decir, de un cuerpo que absorbe toda la luz que cae sobre él. Cuando un cuerpo negro es calentado emite radiación electromagnética. Algo similar a lo que sucede cuando calentamos un horno y sentimos cómo la radiación emitida nos quema. Más aún, si lo calentamos a temperaturas muy altas, podemos ver la radiación emitida, parte de la cual cae en la región visible del espectro. El problema se presentó cuando los físicos se preguntaron cuánta luz emite un cuerpo negro en las altas frecuencias (cuánta en la azul, cuánta en la violeta, y cuánta más allá, en el ultravioleta, rayos x, etc., hasta el infinito) y cuánta en las bajas frecuencias. El problema tiene importancia teórica —por razones que no viene al caso detallar— y grande fue el desconcierto cuando se encontró que la física clásica (en este caso, la teoría de Maxwell combinada con la teoría del calor o termodinámica) predice que debe haber mayor radiación conforme más alta es la frecuencia —debido a que hay muchas más frecuencias altas que bajas y todas tienen iguales posibilidades de aparecer—. Pero este resultado está equivocado, pues si fuera cierto significaría que prácticamente toda la radiación sería a frecuencias muy, muy altas, y se observa que éste no es el caso. Por ejemplo, conforme calentamos el horno, vemos que el color de la luz radiada va cambiando; pasa de rojizo, a rojo subido, a naranja, a azuloso finalmente, pero no es violeta ni menos aun ultravioleta a cualquier temperatura.

Los físicos del siglo pasado lograron encontrar dos fórmulas para describir parcialmente este fenómeno; una es la fórmula de Rayleigh, derivada con los métodos de la física, que describe correctamente lo que se observa a bajas frecuencias pero no a las altas. La otra es la fórmula de Wien, que no tenía justificación teórica alguna pero ajustaba excelentemente los datos experimentales a altas frecuencias, pero no a las bajas. Planck se dio a la tarea de entender este problema y en 1900 pudo ofrecer una fórmula —famosísima, y que lleva su nombre— que describe correctamente los datos observacionales a todas las frecuencias y a todas las temperaturas. El punto crucial está en que para obtener su fórmula, Planck tuvo que introducir una hipótesis por demás extraña: la energía electromagnética que absorbe o que emite un cuerpo negro viene en "paquetes" y sólo se pueden intercambiar paquetes enteros de energía. Como en los supermercados: se puede comprar uno, dos..., cien kilos de azúcar, pero no kilo y cuarto, por ejemplo. A estos paquetes de energía electromagnética Planck los llamó *cuantos* (o *quantos;* palabra latina que significa precisamente *cuanto).* Se considera a este trabajo como la primera piedra de la física moderna y a Planck, en consecuencia, como el fundador de las teorías cuánticas. Sin embargo, un largo camino tenían aún los físicos por delante.

El problema se quedó aquí, donde Planck lo dejó, por varios años. Aunque estaba claro que la fórmula de Planck era correcta, la idea de introducir un elemento tan exótico como el cuanto de energía no convencía a nadie —de hecho, ni al propio Planck, quien durante varios años hizo un tan inútil como honesto esfuerzo por rederivar su fórmula sin romper tan bruscamente con los principios clásicos—. Como veremos más adelante, a finales del siglo pasado todavía no era universalmente aceptada la idea de que la materia tiene estructura molecular —grandes figuras como Ostwald y Mach consideraban a las moléculas

como meras ficciones—. La razón atrás de esta actitud se puede encontrar en la convicción de que la naturaleza es continua, pues todas las ecuaciones de la física teórica de la época eran perfectamente consistentes con esta hipótesis. Luego para la física clásica la noción de una estructura discreta, granular, es superflua. Y es principio general de la ciencia desechar lo superfluo. 1 Pero si los físicos de 1900 no estaban aún en condiciones de aceptar como establecida la naturaleza granular de la materia, ¿menos aún estaban dispuestos a oír hablar de granos de energía luminosa! 2

En 1905 Einstein retomó este problema, pero desde un ángulo enteramente nuevo. Como veremos más adelante en este mismo capítulo, para esas fechas Einstein había ya elaborado una teoría que le permitía calcular el comportamiento estadístico de sistemas constituidos por muchos cuerpos, como los gases compuestos por moléculas y cosas similares. Los detalles los dejamos para más adelante, aceptando por el momento que Einstein disponía de herramientas teóricas, que él mismo había creado, para hacer estudios estadísticos. Bien, pues a Einstein se le ocurrió hacerse una pregunta: ¿Qué pasa si aplico mis métodos estadísticos al problema del cuerpo negro? De hecho Einstein tenía dos posibilidades: una era aplicar sus métodos estadísticos y usar la fórmula de Rayleigh, es decir, estudiar un problema puramente clásico (y el resultado seguramente estaría mal); la otra era hacer lo mismo, pero con la fórmula de Planck (y el resultado sería seguramente novedoso, pero correcto). Einstein calculó entonces lo que se llaman *las fluctuaciones de la energía de la luz.* 3 El cálculo le mostró que la fórmula de Planck predecía lo mismo que la de Rayleigh, pero agregando un término adicional a las fluctuaciones: la energía de un cuerpo negro fluctúa más que lo que dice la física clásica. Pero Einstein dio otro paso adelante. Comparó sus resultados con los que había obtenido pocos años antes para las fluctuaciones de la energía de un gas diluido y encontró algo sorprendente: ¡eran iguales a las del nuevo término recién descubierto por él! ¡Luego aquí estaba la explicación a la hipótesis de Planck! Todo queda claro si aceptamos que en el campo electromagnético existen componentes similares a las moléculas de un gas, es decir, pequeños corpúsculos o "paquetes" luminosos que porta cada uno una energía definida y se pueden ver como "moléculas" de luz. Estas "moléculas" producen el término similar al de los gases, y el que se trate de luz, es decir, de ondas, explica el término que da la teoría de Maxwell. Con el curso de los años a estas "moléculas" electromagnéticas se les llamó *fotones.*

EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Einstein puso a prueba su hipótesis. Si la luz tiene una estructura granular, esto debe observarse no sólo en algún caso aislado como el estudiado por Planck, sino en multitud de situaciones diferentes. Pronto encontró un problema no resuelto e inintelegible para la física de su época, al menos tanto como el problema del cuerpo negro, y que se resolvía mágicamente con su hipótesis: el efecto fotoeléctrico consiste en que ciertos materiales, al ser expuestos a la luz, emiten electrones: el fenómeno fue observado y reportado por Hertz durante sus experimentos para producir ondas electromagnéticas. Cuando se le sometió a estudio experimental, se observó que tenía propiedades sorprendentes e inaccesibles para la física de la época, por lo que permaneció inexplicado. Entre estas propiedades ininteligibles mencionaremos las siguientes. Se observó que aumentando la iluminación —lo que significa dar mayor energía al material— *no* aumentaba la energía de los electrones emitidos, sino sólo su número; asimismo, se encontró que luz de diferentes colores podía producir efecto fotoeléctrico, pero que para cada material había un color —o mejor, una frecuencia— de la luz abajo de la cual simplemente desaparecía el fenómeno. Experimentalmente quedó claro que esta frecuencia de corte es característica de cada material.

Si pensamos en el efecto fotoeléctrico en términos de una onda electromagnética que incide sobre un átomo, el que absorbe su energía y libera un electrón, simplemente no podremos explicarnos este comportamiento, al menos si nos negamos a construir una teoría *ad hoc* que, por su carácter hechizo poco o nada explicaría y menos convencería. Pero Einstein vio el problema desde su nueva perspectiva, y notó que todo cambia de golpe desde ella. Pensamos en la luz como constituida por paquetes de energía de

valor *hf;* un átomo absorbe un paquete y se queda con esta energía; parte de ella —o toda, en el mejor de los casos— se transfiere en alguna forma por los mecanismos internos atómicos a uno de los electrones del átomo. El electrón se acelera debido a esta energía y se escapa del átomo; pero como tiene que vencer la atracción del átomo ionizado que abandona, pierde una parte de esta energía, la que llamaremos *W;* luego la máxima energía con que el electrón puede escaparse es

$$E_{max} = hf - W \qquad (1)$$

Ésta es la famosísima fórmula del efecto fotoeléctrico de Einstein. Veamos algunas de sus predicciones. Supóngase que hacemos una serie de experimentos fotoeléctricos cambiando en cada ocasión la intensidad de la luz, pero sin cambiar el color. Como ***f*** es fija, nada cambia en la fórmula (1) en cada experimento, por lo que observamos cada vez la misma E_{max}, sólo que cuando la luz sea más intensa habrá más paquetes de energía ***hf*** disponibles y veremos más electrones liberados. Repitamos ahora los experimentos, pero manteniendo fija la intensidad y variando el color de la luz; cuando lleguemos a una frecuencia de luz tan baja que *hf* adquiere el valor *W* o un valor menor, la energía ***E*** de que pueden disponer los electrones se reduce a cero y no puede haber más efecto fotoeléctrico. Luego existe una frecuencia de corte del fenómeno que está dada por la fórmula

$$f_{corte} = \frac{W}{h} \qquad (2)$$

Las propiedades que acabamos de deducir son precisamente las observadas para el efecto fotoeléctrico; luego la teoría es *cualitativamente correcta.* Para comprobar la validez de las predicciones *cuantitativas* de la teoría, todo lo que tiene que hacerse es probar la fórmula (2). Ésta es una fórmula muy interesante, que dice que la energía *W* y la frecuencia de corte de un fotocátodo dado deben tener un cociente cuyo valor no depende del material que se use para construir el dispositivo y que esta constante es precisamente la de Planck. Luego aquí hay un método novedoso para hacer una determinación no termodinámica de la constante de Planck.

La teoría de los cuantos de luz propuesta por Einstein encontró mucha resistencia. En particular, el notable físico experimental norteamericano Robert Millikan (1868-1953) no creyó en ella y se propuso mostrar su invalidez probando experimentalmente que la fórmula (2) conducía a resultados erróneos. Después de un meticuloso y largo trabajo, concluyó que el valor de la constante de Planck determinado con los métodos fotoeléctricos coincide con el valor previamente establecido con ayuda del cuerpo negro y reconoció la validez de la teoría. En la actualidad, el método fotoeléctrico es usado en los laboratorios de enseñanza para medir el valor de ***h***. Aun así, tuvo que pasar mucho tiempo para que la teoría de los fotones de Einstein alcanzara aceptación general, lo que sucedió alrededor de 1923, gracias en mucho a los trabajos experimentales del físico norteamericano Arthur Compton (1892-1962).

LA CUANTIZACIÓN DE LA MATERIA

Pese al escepticismo general con que fue recibida la hipótesis de la cuantización de la luz, Einstein la desarrolló tanto como le fue posible y trabajó sobre el tema desde muy diversos ángulos por casi dos décadas. Pero Einstein pronto comprendió que era posible y necesario generalizar su hipótesis de cuantización. En particular entendió que no hay razón alguna para pensar que sólo los osciladores del campo electromagnético tienen propiedades cuánticas: precisamente, la hipótesis opuesta, es decir, que *todos* los osciladores deben poseer propiedades cuánticas, parece más natural. Para poner a prueba esta nueva hipótesis, Einstein la aplicó en 1906 a los átomos que forman un cuerpo sólido calculando lo que en

el lenguaje de los físicos se llama *el calor específico de un sólido,* que es una propiedad que depende del material del que está hecho y mide cuánto aumenta su temperatura cuando le suministramos una cantidad fija de calor al cuerpo.

Desde principios del siglo XIX se sabía por vía experimental que el calor específico de los sólidos simples es una constante, la misma para todos, cuando se mide en unidades apropiadas. En 1876 Boltzmann pudo explicar teóricamente este hecho, basado en un resultado muy general de la teoría cinética: el teorema de equipartición de la energía, el cual establece que una vez alcanzado el equilibrio, los osciladores tridimensionales que forman la malla de un sólido simple tienen cada uno la misma energía de oscilación, cualquiera que sea su frecuencia de oscilación. Esto determina que el calor específico del cuerpo sea constante.

Ahora bien, la situación real era un tanto más compleja que lo descrito, pues se sabía que aunque en la gran mayoría de los casos el calor específico observado correspondía al esperado, también se conocían desviaciones de esta simple ley. Por ejemplo, que el diamante tiene un calor específico varias veces menor que el valor usual. Y, para complicar las cosas, trabajos de Heinrich Weber, James Dewar y otros físicos habían mostrado que para *algunas* sustancias, entre ellas el diamante, el calor específico decrece al reducirse la temperatura del cuerpo. Sin embargo, la tendencia general era considerar estas excepciones como tales, intentando explicarlas con ideas particulares, corno que algunos de los osciladores del cuerpo se van "apelmazando" al bajar la temperatura. En otras palabras, aunque se estaba frente a observaciones no entendidas del todo, no se sentía la existencia de ningún problema de fondo en conexión con los calores específicos de los sólidos en la época en que Einstein abordó el tema.

Pero las cosas se presentan en otra forma desde la perspectiva de Einstein. Si consideramos a los átomos que constituyen la malla del sólido como pequeños osciladores cuánticos de frecuencia f, entonces cada uno tendrá una energía hf si la hipótesis cuántica es correcta. Esto quiere decir que *no es cierto que cada oscilador tiene una energía independiente de su frecuencia,* como afirmaría la ley clásica de equipartición. Calcula Einstein entonces el calor específico del sólido usando la fórmula de Planck (que es la que describe osciladores cuánticos) en vez de la de Rayleigh (que es la que describiría osciladores clásicos) y encuentra que el resultado depende de la temperatura, aunque a temperaturas suficientemente altas (la temperatura ambiente para la mayoría de los materiales) se recupera el resultado clásico. Unos cálculos numéricos sencillos muestran que la curva que da la nueva teoría se ajusta bastante bien a las desviaciones para el diamante y otros elementos. Luego, contrariamente a los que se creía, las desviaciones conocidas de los calores específicos de su valor clásico *si* apuntaban hacia un problema fundamental: en esos casos *no* se obedecen las leyes de la física clásica, sino de la física cuántica (la que tendría que construirse).

Este trabajo de Einstein es importante por dos razones al menos. Por un lado, permitió ver que el fenómeno de la cuantización —es decir, de la existencia de valores discretos, discontinuos, de la energía y otras cantidades físicas— no se circuscribe a un reducido grupo de casos más o menos singulares, sino que es una propiedad general de la naturaleza. De hecho, en el trabajo que preparó en 1909 como ponencia para un congreso en Salzburgo —que fue el primer congreso en que participó— fue aún más lejos, al señalar explícitamente, el primero entre todos, que la descripción cuántica tanto de la luz como de las moléculas deberá contener simultáneamente aspectos corpusculares y ondulatorios. Esto constituye el germen de lo que quince años más tarde sería la mecánica cuántica. En segundo lugar, es el primer trabajo en que se estudia un fenómeno cuántico en un sólido; puede decirse que con este trabajo Einstein fundó la física cuántica del estado sólido, que hoy constituye una de las ramas más estudiadas de la física, por sus enormes e importantes aplicaciones prácticas.

EL TAMAÑO DE LAS MOLÉCULAS

Nos regresamos a abril de 1905. Einstein acaba de escribir su trabajo sobre la cuantización de la luz y el efecto fotoeléctrico e inicia la escritura de su tesis doctoral. Tanto la tesis —publicada un año después— como el trabajo escrito a continuación, se refieren a un problema enteramente diferente: el movimiento browniano. ¿Qué es el movimiento browniano y por qué ocupa Einstein su atención en él? Para responder

a estas preguntas debemos retroceder unos pocos años.

Como dijimos antes, a la entrada de nuestro siglo los físicos aún no habían adoptado unánimemente el modelo molecular de la materia. Pese a los enormes éxitos que los químicos habían alcanzado en la comprensión de varios problemas importantes a partir de la hipótesis de que la materia está constituida por moléculas —hipótesis enunciada en esta forma ya por el químico inglés John Dalton (1766-1844) en 1803—, y de que éstas a su vez están formadas por átomos; pese asimismo a que la propia física había avanzado considerablemente en la construcción de la teoría cinética de los gases, la profunda convicción reinante de que la naturaleza es esencialmente continua —y que podríamos en principio subdividir un trozo de materia en granos tan pequeños como queramos, sin límite alguno— conducía a muchos físicos, incluyendo grandes personalidades, a considerar al modelo molecular como algo útil, pero carente de mayor significado real.

Einstein —como muchos otros físicos de la tradición de Maxwell y Boltzmann— desde muy temprano aceptó el modelo molecular como una imagen relativamente fiel de la naturaleza y se impuso como tarea encontrar métodos capaces de poner en evidencia su validez en forma concluyente. Podemos considerar que el trabajo de investigación realizado por Einstein hasta 1905 es una etapa preparatoria para esta tarea —aunque también fue decisivo para sus estudios sobre la cuantización de la luz, como vimos en las secciones anteriores—. El problema que Einstein se planteó durante el periodo 1902-1904 fue el de derivar las leyes de la termodinámica como resultado del hecho de que la materia a escala macroscópica está constituida por un gran número de moléculas en agitación térmica. Debido al inmenso número de partículas involucradas, es imposible hacer una descripción detallada de lo que sucede, por ejemplo, en un gas; pero sí podemos pretender hacer una descripción estadística y crear con ello lo que se llama la *mecánica estadística*. En alguna forma, el embrión de esta idea se encuentra ya en los trabajos de Maxwell y Boltzmann sobre la teoría cinética de los gases. Una idea cercana a la de Einstein la había tenido pocos años antes el físico norteamericano Josiah Gibbs (1839-1903) para desarrollar la termodinámica química, pero sus trabajos eran prácticamente desconocidos en la Europa de principios de siglo; hoy se considera tanto a Gibbs como a Einstein los fundadores de la mecánica estadística. Fue precisamente el contar con los métodos de la mecánica estadística lo que le permitió a Einstein recorrer un camino tan complejo, diverso y novedoso en tan corto tiempo como lo hizo en 1905.

A Einstein se le ocurrió una idea innovadora para elaborar un método que permitiera "ver" directamente los efectos de la permanente agitación térmica de las moléculas de un cuerpo. Supongamos que un líquido contiene pequeñísimas partículas en suspensión, como podrían ser granos de colorante o de polen en agua, etc. Como debemos suponer que las moléculas del líquido se mueven al azar, estarán golpeando a la partícula en suspensión por todos lados y en todas direcciones permanentemente; el efecto de la gran mayoría de los impactos tenderá a cancelarse mutuamente pero será normal que quede un pequeño efecto residual que pondrá al grano en movimiento, ora para arriba, ora a la izquierda, y así sucesivamente. De este modo, debido al impacto de las moléculas, si el grano en suspensión es suficientemente pequeño, deberá tener un movimiento *incesante* altamente irregular y muy complicado: Einstein de inmediato percibió que aquí tenemos un mecanismo para ver el movimiento (errático) que constituye el calor y, mucho más importante, para ver un efecto directo del movimiento de las moléculas. Einstein no lo sabía, pero este fenómeno había sido observado —pero no explicado— varias décadas antes por el botánico escocés Robert Brown (1773-1858) —el mismo que observó que los tejidos vegetales es un elemento estructural regular y propuso el término *núcleo* para identificarlo— y por esta razón se le conoce como movimiento browniano.

Einstein fue capaz de elaborar una teoría estadística del movimiento browniano y de mostrar que a partir del seguimiento del movimiento de una de estas partículas bajo el microscopio era posible medir el *tamaño* de las moléculas del solvente. De hecho, durante el año de 1905 Einstein presentó varios métodos diferentes para determinar las dimensiones moleculares (en particular, éste es el tema de su tesis doctoral), y el mismo año de 1905 publicó diversas extensiones a su teoría original. Los resultados de Einstein [4] fueron rápidamente puestos a prueba en varios laboratorios, particularmente en el del físico francés Jean Perrin (1870-1942) y su grupo a partir de 1908, quienes pudieron determinar con los métodos de Einstein

las dimensiones moleculares y el número de Avogadro (es decir, el número de moléculas que contiene un mol de un gas en condiciones normales de presión y temperatura). Los resultados finales fueron tan convincentes, que el mismo Oswald reconoció en las moléculas objetos reales y no meras ficciones de uso conveniente, dando por resuelto el asunto. Quien nunca pudo aceptar la realidad de las moléculas fue Mach.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

A principios de mayo de 1905 Einstein envió su artículo sobre el movimiento browniano a los *Annalen der Physik* y pasó a ocuparse de otros asuntos. En junio envió a publicación el trabajo en que crea la teoría de la relatividad. Aparentemente, unas cuantas semanas le bastaron para construir está teoría; más, como hemos visto, atrás había una historia de búsqueda y meditación de casi una década. Einstein termina su artículo sobre la teoría de la relatividad agradeciendo a su amigo M. Besso la ayuda brindada para la construcción de la teoría a través de discusiones. En aquellos años, Besso trabajaba en la Oficina de Patentes junto con Einstein; de hecho, este último le había conseguido el puesto, en parte por ayudar al amigo, en parte para tenerlo cerca y poder discutir con él los problemas de principio que le inquietaban; Einstein escribió alguna vez que en Besso encontraba su mejor caja de resonancia en toda Europa. En una conferencia que dictó en Japón en 1922, Einstein recordó cómo, al día siguiente de una prolongada discusión con Besso, buscó al amigo simplemente para agradecerle la deliberación, comentándole que gracias a ella había logrado que todas las piezas del rompecabezas embonaran: cinco semanas después estaba listo el artículo más famoso de Einstein: "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", con el que nace la teoría de la relatividad.

Como vimos en el primer capítulo, Einstein veía muy claramente que las leyes de la vieja mecánica clásica y las de la teoría electromagnética de Maxwell de creación reciente, pero muy bien fundada y comprobada— eran incompatibles; esto implicaba la necesidad de cambiar al menos una de estas teorías. Lo importante era entender qué es lo que debía cambiarse. Para Einstein había un dato cierto, que podemos inferir como sigue. En el experimento pensado del corredor alcanzando un rayo de luz, el corredor verá luz, cualquiera que sea la velocidad con que corra; pero la luz viaja a su velocidad *c*, pues de no ser así no sería la luz descrita por las ecuaciones de Maxwell. Luego debemos concluir que cualquiera que sea la velocidad del corredor, la luz que pasa a su lado viaja con la misma velocidad *c*. Esto quiere decir que *la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, independientemente de la velocidad con que se muevan e independientemente de la velocidad de la fuente emisora.* Después de verificar que esta conclusión es consistente con una serie de observaciones y fenómenos conocidos, Einstein la elevó a la categoría de principio: éste es uno de los dos principios en que se funda la nueva teoría. 5

Ahora podemos entender por qué fracasó el experimento de Michelson y Morley, y por qué dijimos que en su fracaso residía su importancia. En la concepción de este experimento se suponía que la velocidad de la Tierra se agregaría a la de la luz que llega frontalmente. Pero precisamente el postulado de Einstein dice lo contrario, es decir, que cualquiera que sea la dirección de la luz respecto al movimiento de la Tierra, *mediremos la misma velocidad c.* Luego si la hipótesis es cierta, el experimento debe fallar; y falló. Usualmente se considera a los experimentos de Michelson y Morley como un sólido soporte experimental para la teoría de la relatividad, aunque Einstein utilizó inicialmente otros efectos para llegar a esta conclusión.

Alcanzado este punto, el problema era construir una mecánica nueva que permitiera que la luz tenga la misma velocidad para todos los observadores, sea como sea que se muevan y sin introducir inconsistencias. Einstein encontró la salida llevando a sus últimas consecuencias una línea de pensamiento que había encontrado en Poincaré y Mach: las nociones de espacio y tiempo absolutos de la mecánica no son lógicamente necesarias ni están garantizadas por la experiencia. Un análisis profundo de este problema

—estimulado por sus discusiones con Besso— le permitió a Einstein confirmar la idea —ya avanzada por Poincaré— de que el concepto de simultaneidad no tiene un carácter absoluto, sino que depende del estado de movimiento relativo. Esto quiere decir, por ejemplo, que si un observador parado en un andén considera dos eventos A y B como simultáneos, un viajero que los ve desde un tren en movimiento no los consideraría como simultáneos. Esto parece contradecir nuestra experiencia cotidiana, pero todo se resuelve cuando se observa que la diferencia de tiempo que el observador en el tren asignaría a los eventos es tan pequeña, que pasa totalmente desapercibida (¡precisamente por esto podemos usar la mecánica clásica!). Pero entonces, si es despreciable, ¿por qué hemos de preocuparnos por ello? El punto es de *principio:* ¿cuáles son las nociones correctas que debemos manejar al eliminar el espacio y el tiempo absolutos? Además, la diferencia es despreciable sólo debido a que el tren corre despacio; si su velocidad fuera muy alta, comparable con la de la luz, las diferencias podrían ser muy considerables. Basta que pensemos que si el portador de la lámpara corre a la velocidad de la luz, aun así la luz que pasa a su lado sigue viajando con la misma velocidad *c*, para que notemos qué diferente será esta nueva mecánica de la clásica.

Para estar en condiciones de construir la nueva mecánica, Einstein propuso un principio adicional: *las leyes de la física deben ser las mismas para todos los observadores, independientemente de que unos se muevan uniformemente respecto a los otros.* Éste, que no es sino una manera muy general de decir que no hay observadores privilegiados, "en reposo" respecto a algo (como podría ser un pretendido espacio absoluto o el éter), es el llamado *principio de relatividad,* del cual la teoría deriva su nombre. Este principio, en combinación con el de la constancia de la velocidad de la luz, le permitieron a Einstein construir la teoría especial de la relatividad. Puesto que el espacio y el movimiento absoluto desaparecen en esta teoría, Einstein propuso hacer a un lado por superflua la noción de éter. Nótese que en el principio de relatividad se toman en cuenta sólo observadores que se mueven uniformemente unos respecto a otros; debido a esta limitación se habla de teoría especial. Desde el principio Einstein mostró interés en extender la teoría a observadores en movimiento arbitrario y construir con ello una teoría *general* de la relatividad; la tarea resultó inmensa, y requirió de una década de esfuerzos, pero de ello hablaremos más adelante.

ALGUNOS EFECTOS RELATIVISTAS

Vemos que la teoría de la relatividad es una nueva mecánica, consistente con la teoría de Maxwell y que rebasa a la vieja mecánica de Newton al eliminar sus elementos absolutistas. Estas dos mecánicas son prácticamente equivalentes (desde el punto de vista numérico) a las velocidades usuales, las que son muy pequeñas en relación con la velocidad de la luz, pero pueden diferir considerablemente para el caso de cuerpos que se mueven a grandes velocidades. Para estudiar el movimiento de un automóvil o un avión, incluso de un cohete interplanetario, seguimos usando la mecánica de Newton. Pero para una descripción correcta de los electrones o los protones en un acelerador de partículas, es indispensable hacer un tratamiento relativista.

Un primer resultado importante de la teoría de la relatividad es que ningún cuerpo puede alcanzar la velocidad de la luz: la velocidad *c* de la luz es un límite que la naturaleza impone al movimiento de cualquier cuerpo. Esto se debe a que la masa de un cuerpo resulta depender de su velocidad, siendo mayor conforme mayor es la velocidad, 1 y haciéndose infinitamente grande cuando el cuerpo alcanza la velocidad de la luz. Como ningún cuerpo puede tener una masa infinita (que sería mayor que la del Universo) tampoco puede alcanzar la velocidad *c*.

Otro resultado muy importante es que existe una equivalencia fundamental entre masa y energía. A esta conclusión llegó Einstein el mismo año de 1905, en su segunda nota sobre la teoría de la relatividad, enviada a publicación el mes de septiembre y se expresa mediante la famosa fórmula

$$E = mc^2 \qquad (3)$$

En palabras, esta ley dice que un pedazo cualquiera de materia de masa *m* contiene una energía dada por el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz; como la velocidad de la luz es una cantidad enormemente grande, la energía así calculada también resulta enorme.6 Quizá sea éste el resultado de la teoría de la relatividad que más consecuencias ha tenido para la humanidad. Es bien sabido que los reactores nucleares y las bombas atómicas trabajan convirtiendo parte de la masa de los núcleos atómicos en energía (que es liberada básicamente como energía térmica). La naturaleza usa en nuestro beneficio la misma solución, pues es una reacción nuclear que transforma masa en energía, la que mantiene ardiendo al Sol y a todas las estrellas y soporta la vida en la Tierra.

Otro resultado interesante de la teoría de la relatividad es que la longitud que le asignamos a una barra depende de si la medimos desde un sistema en reposo o en movimiento respecto de ella; 7 análogamente, el intervalo de tiempo que un observador asigna entre dos eventos, depende de la velocidad del observador. Un ejemplo de esta *dilatación del tiempo* es el siguiente. En la naturaleza existen muchas partículas que espontáneamente se transforman en otras y esto lo hacen en un tiempo fijo que les es característico. Por ejemplo, un pion decae espontáneamente en un muon y un neutrino 8 en aproximadamente un cienmillonésimo de segundo después de formado Sin embargo, si al generar el pion le damos suficiente energía para que se mueva a gran velocidad por ejemplo 0.99999 veces la velocidad de la luz, veremos que vive un tiempo 100 o más veces lo normal. Esto se debe a que el pion cuenta *su* tiempo desde su propio sistema y es respecto de él como vive su vida completa; pero ese cienmillonésimo de segundo visto desde el laboratorio, que se mueve respecto al pion a una velocidad muy cercana a la de la luz, se transforma por la dilatación relativista del tiempo en un intervalo centenares de veces mayor. De esta manera, la relatividad enseña que el tamaño y la forma de los objetos, así como la marcha de los relojes, depende del movimiento: el mundo relativista es notablemente más complejo y rico que el mundo de la física clásica. Ya veremos más adelante cómo estos resultados se enriquecen aún más en la teoría general de la relatividad.

LA IDEA MÁS FELIZ DE MI VIDA

En 1907 Einstein inició la preparación de un artículo de revisión sobre la teoría de la relatividad que le fue solicitado. Poco había sido contribuido por otros autores al desarrollo de esta teoría; las primeras contribuciones importantes a la relatividad no producidas por Einstein se deben a Planck y a Von Laue; de hecho, Planck fue el primer físico que apreció el valor de esta teoría e hizo mucho por difundirla, entrando incluso en contacto epistolar con Einstein, lo que propició el surgimiento de una amistad y relación de mutuo aprecio que duró el resto de sus vidas. En 1907 apareció el trabajo de Hermann Minkowski (matemático ruso- alemán [1864-1909] que había sido profesor de Einstein en el ETH) en que le dio a la teoría de la relatividad la forma matemática que hoy es usual 9 y que le abrió camino a Einstein para el desarrollo ulterior de la teoría general.

Un día, sentado en su escritorio en la oficina de patentes, pensando un poco sobre su artículo de revisión, Einstein tuvo lo que años más tarde llamó la idea más feliz de su vida y que le condujo a una primera versión, aún provisional e incompleta, de lo que con el tiempo constituiría la teoría general de la relatividad. Este pensamienfo feliz constituye la base del *principio de equivalencia.* Supongamos dos observadores iguales encerrados en sendos elevadores y haciendo cada uno el mismo experimento físico; uno de los elevadores está quieto, pero sumergido en un campo gravitatorio que actúa hacia abajo; sobre el

otro elevador no actúa ningún campo externo, pero es jalado con aceleración constante hacia arriba (Figura 1). Pensando un poco advertimos que no hay diferencia observable entre los dos casos: ambos experimentadores obtendrán exactamente los mismos resultados de sus experimentos, cualesquiera que ellos sean. En otras palabras, *los efectos (locales) de un campo gravitatorio son exactamente equivalentes a los que produce una aceleración uniforme apropiada.* En breves palabras, tomadas del propio Einstein: "Si una persona cae libremente, no siente su propio peso." Esta equivalencia se cumple debido sólo a que la masa inercial de los cuerpos (es decir, la masa que se opone a los cambios de movimiento) es exactamente igual a su masa gravitatoria (es decir, a la masa que es atraída por la gravitación), pues debido a ello todos los cuerpos se aceleran igual en un mismo campo gravitatorio y, por lo tanto, podemos sustituir a este último por la aceleración común que produce. Por esta razón Einstein elevó a la categoría de principio el hecho empírico —y no explicado por la física clásica— de la igualdad entre los dos tipos de masas.10

Con el principio de equivalencia en la mano. Einstein podía tratar de extender el principio de relatividad a movimientos acelerados: no hay razón *a priori* para que el principio de relatividad no valga para cualquier forma de movimiento, y el poder *eliminar* el campo gravitatorio introduciendo una aceleración en su lugar permitía incluir en la teoría no sólo la óptica, sino la gravedad. La conclusión más inmediata a la que llegó fue que una teoría general de la relatividad le debería permitir construir una teoría de la gravitación.

Veamos otra consecuencia simple del principio de equivalencia, aplicado al caso de la luz. Supongamos que al elevador que se mueve aceleradamente hacia arriba entra un haz de luz que viaja sobre la horizontal; durante el tiempo que el haz tarda en cruzar al elevador, éste se mueve hacia arriba. El observador dentro del elevador (que siente que se encuentra dentro de un campo gravitatorio) observa la desviación del haz y concluye que la luz se *desvía al pasar por un campo gravitatorio* (Figura 1). En 1907 Einstein pensó que este efecto de desviación de la luz por la gravedad era demasiado pequeño para ser observado y no le dio mayor importancia. Sin embargo, algunos años más tarde, sería precisamente este efecto el que lo llevaría al pináculo de la fama.

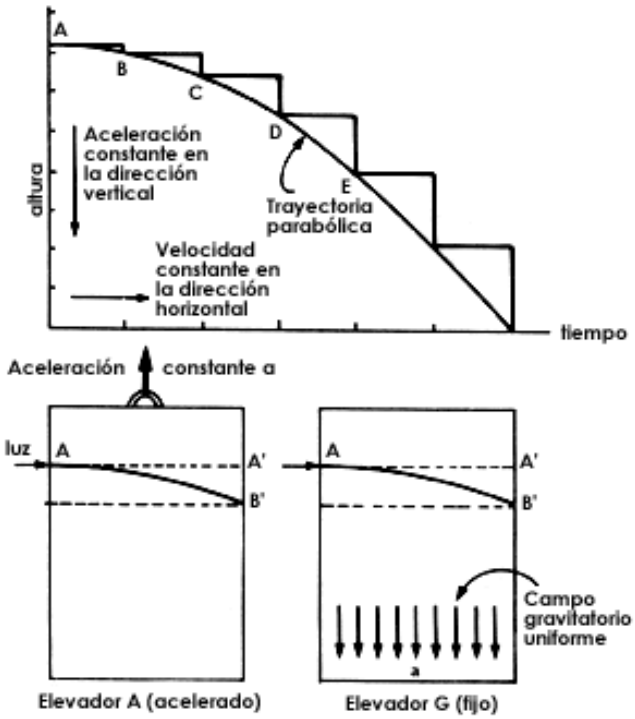


Figura 1. El principio de equivalencia y la desviación de la luz. En la parte superior se muestra cómo al componer un movimiento horizontal de *velocidad* constante con uno vertival de *aceleración* constante (y velocidad creciente) se produce una trayectoria parabólica. Un ejemplo simple de este

movimiento es el de un proyectil lanzado horizontalmente que cae por la acción de su peso.

En la parte inferior se muestra el principio de equivalencia y su efecto sobre un rayo de luz. El elevador A sube con aceleración constante *a*, por lo que el rayo de luz sigue una trayectoria parabólica y cae en el punto B´, y no en A´, que es donde caería si el elevador no se moviera. El elevador G está fijo sobre la tierra, pero sujeto a su campo gravitatorio, el que produce una aceleración *a* hacia abajo. Por el principio de equivalencia, el rayo luminoso que entra por A se desvía y cae en B´.

Una consecuencia adicional que aparece ya en el trabajo de 1907 se refiere al *corrimiento de la luz hacia el rojo.* Así como hay una dilatación del tiempo debida a la velocidad, también la hay debida a la aceleración —al menos por la velocidad producida por la aceleración— del principio de equivalencia sigue que debe haber una dilatación del tiempo debida a la presencia de un campo gravitatorio. Supongamos ahora que observamos luz que nos llega del Sol; puesto que los átomos que la produjeron están sujetos a un intenso campo gravitatorio, la luz que recibimos debe ser más roja (es decir, de menor frecuencia o de paso más lento) que la generada con los mismos métodos en la Tierra. Retornaremos a este tema en el próximo capítulo.

El siguiente comentario al tema de la deflexión de la luz parece oportuno. Basado en su hipótesis de que la luz está formada por corpúsculos, Newton llegó a sugerir en su *Optica* la posibilidad de que la gravitación afectara a distancia la trayectoria rectilínea de un rayo luminoso. La predicción de Einstein en sus trabajos iniciales sobre la desviación de la luz corresponde a esta "deflexión newtoniana", de origen puramente gravitatorio. Sin embargo, cuando en 1915 Einstein dio forma final a su obra maestra *Fundamentos de la teoría general de la relatividad,* trabajo en que la teoría alcanza su forma definitiva, mostró que además del efecto newtoniano hay otro, puramente relativista, de magnitud igual al anterior, de tal manera que la teoría final predice el doble de lo que las variantes iniciales sugerían. Fue precisamente este punto el que pusieron a prueba las famosas mediciones del eclipse solar de 1919. Pero sobre de estos temas hablaremos más tarde.

LA ECLOSIÓN

Es lugar común hablar del año 1905 como el año milagroso de Einstein. Y el asombro es justo; hemos visto cómo en el curso de tan sólo cuatro meses de ese año funda las teoría cuánticas de la luz, del movimiento browniano y de la relatividad. Cualquiera de estos resultados es suficiente para llenar de satisfacción a un físico respetable y al menos dos de ellos pueden legítimamente ser considerados una revolución en la física. Lo que normalmente no se comenta es cómo poco tiempo después Einstein se acerca mucho a una repetición del milagro: en el curso de menos de un año —de fines de 1906 a septiembre de l907— Einstein da dos nuevos pasos adelante de singular importancia y novedad: nos referimos a la teoría cuántica de los calores específicos (es necesario cuantizar la materia, y no tan sólo el campo de radiación) y al principio de equivalencia y sus primeras consecuencias. Otros dos resultados suficientes para llenar la vida de nuestro hipotético respetable investigador. Uno no puede menos que hacer suya la pregunta de Pais: 11 "¿Pero es que este hombre nunca va a parar?"

En 1909 seproduce la eclosión social de Einstein. A mediados de año se le notifica que con motivo del 350 aniversario de la fundación por Calvino de la Universidad de Ginebra, se ha acordado concederle un doctorado *honoris causa;* el honor lo recibe junto con María Curie y Wilhelm Ostwald, entre un centenar de personas. Poco tiempo después recibe la invitación de la Sociedad Alemana de Ciencias Naturales para presentar una ponencia en su próxima reunión de Salzburgo, que mencionamos un poco más arriba. Ésta fue la primera oportunidad que tuvo Einstein de entrar en contacto con físicos en activo: ahí se encontró por vez primera con Planck, Wien, Sommerfeld, Born, e incluso con Ludwig Hopf, quien pronto sería su asistente. Finalmente, deja su puesto de la Oficina de Patentes, en el tercer piso de la Oficina de Correos y Telégrafos y parte para Zurich.

Einstein tiene treinta años; ha vivido fuera de los círculos académicos y ha escrito dos trabajos que revolucionan la física clásica; tiene en maduración el germen de lo que devendrá en pocos años más en una nueva teoría de la gravitación y una nueva visión del mundo físico. Se dirige a Zurich a ocupar su primera plaza como profesor universitario.¿¿¿¿

NOTAS

1En su versión general, filosófica, este principio se conoce con el nombre de *navaja de Occam*, William de Occam (c, 13280-1349) fue un importante pensador y reformador inglés, que se opuso al poder del papado. Su famoso dictum *pluralites non est ponenda sine necessitate* —no debe proponerse lo complejo sin necesidad— es citado muy frecuentemente

2 Valgan algunas aclaraciones adicionales para el lector interesado. Planck encontró que los paquetes de energía que el cuerpo puede absorber o emitir tienen un tamaño que crece con la frecuencia *f* de la luz, de tal manera que podía escribir un cuanto de energía electromagnética *E* en la forma $E = h f$, en donde *h* es una constante, la misma para todos los cuantos, y que Planck pudo determinar comparando sus resultados con los del experimento. A la cantidad *h* se le llama constante de Planck y es una de las constantes fundamentales de la naturaleza, junto con la masa y la carga del electrón y la velocidad de la luz. Esta fórmula nos explica por qué en efecto el horno no es azul. Luz de baja frecuencia se emite por paquetes de baja energía; pero para emitir un paquete de muy alta frecuencia es necesario reunir muy alta energía en un sólo paquete, cosa que es poco probable que suceda. Para explicaciones más detalladas, consultar la bibliografía al final del libro.

3 Las fluctuaciones son una medida estadística de los cambios irregulares que ocurren en una cantidad determinada por un proceso muy complejo. Por ejemplo, la población de la República Mexicana crece con los años, pero no lo hace regularmente, sino fluctuando alrededor de una curva estadística. Análogamente, la presión de un gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene se debe al golpeteo de las moléculas sobre ellas; esta presión es relativamente fija en condiciones constantes, pero fluctúa, creciendo y decreciendo constantemente. Su valor promedio es el que permanece constante.

4 En forma simultánea a Einstein el físico polaco Marian Ritter von Smolan-Smoluchowski (1872-1917) realizó investigaciones sobre el movimiento browniano tanto teóricas como experimentales. El trabajo de estos dos pioneros se superpone considerablemente y a ambos se les considera fundadores de la teoría del movimiento browniano, que fue la primera teoría física de los procesos estocásticos, es decir, azarosos.

5 De hecho en la formulación dada arriba estamos combinando los dos principios de la relatividad. Estrictamente, el primer principio de Einstein afirma sólo que c es independiente de la velocidad de la fuente emisora.

6 Por ejemplo, cuando un núcleo de uranio se rompe en fragmentos menores, la masa total de todos ellos es ligeramente menor que la del núcleo inicial; la diferencia de *masas* es liberada como *energía.* Esta energía es aproximadamente un millón de veces la que se obtendría de quemar una masa igual de leña; por eso se dice que la energía útil nuclear es como un millón de veces la energía química o molecular correspondiente.

7 A este fenómeno se le conoce como *contracción de Lorentz (o de FitzGerald Lorentz*) y lo reencontraremos en el próximo capítulo. Antes que Einstein derivara este efecto como un resultado de la cinemática relativista, fue propuesto independientemente por el físico holandés Hendrik Lorentz (18531928) para explicar los resultados negativos del experimento de Michelson y Morley. Con su teoría, Lorentz pudo también predecir la variación de la masa con la velocidad. Lorentz fue el primero que propuso que los átomos contenían partículas cargadas (en 1890) y que ellas, al oscilar dentro del átomo, producían la luz radiada.

8 Pion, muon y neutrino no son sino tres tipos diferentes de las llamadas partículas elementales, de las cuales se conocen varios cientos. Otras partículas elementales son, por ejemplo, el electrón, el protón y el neutrón. También se considera al fotón como una partícula elemental. En el presente contexto, como en general en la física, *espontáneo* significa sin causa aparente o conocida; no significa sin causa.

9 Nos referimos a la noción del *espacio-tiempo de cuatro dimensiones.* Minkowski hizo ver que en la rlelatividad lo que tiene sentido profundo es un elemento matemático, el espacio- tiempo que combina las nociones de espacio y de tiempo; cada una de ellas por separado es insuficiente. En alguna forma esto es análogo a lo que pasa con las dos leyes no relativistas independientes de conservación de la masa y de la energía, que quedan sustituidas por una sola, la conservación de la energía relativista.

10 En el Apéndice 2 se describe un experimento simple para mostrar el principio de equivalencia.

11 En el libro citido en la bibliografía al final.

Indice Siguiente

III. LA GRAN PROEZA

El problema de la gravitación me convirtió

en un racionalista creyente, es decir,

en alguien que busca la única fuente

confiable de la verdad en la simplicidad matemática.

Imagínate mi alegría al encontrar realizable

la covariancia general y que las

ecuaciones describen con precisión

el corrimiento del perihelio de Mercurio.

Estuve varios días fuera de mí de gozosa exaltación.

A. EINSTEIN

LA ESTANCIA de los Einstein en Zurich dura sólo 18 meses. Einstein tiene ahí sus primeros estudiantes doctorales y usa parte de su tiempo para desarrollar un aparato para medir pequeñas fluctuaciones —de tipo browniano— de voltajes.1 Sin embargo, pronto recibe un nombramiento de profesor titular —finalmente151 en la Universidad Alemana de Praga. Pese a las dificultades de su carencia de religión y su ciudadanía suiza se confirma el nombramiento y los Einstein se trasladan a Praga en marzo de 1911. Durante su estancia allí —que también será muy breve— Einstein asiste al Primer Congreso Solvay en noviembre de 1911. Mientras tanto, Marcel Grossmann (1878-1936) —su cercano amigo y excompañero de estudios a quien Einstein dedicara su tesis doctoral—, convertido en profesor de matemáticas en el ETH, procura atraer a Einstein a su vieja escuela. Einstein ve con mucha simpatía la invitación —e incluso declina por ella la oferta que le hace Lorentz de convertirse en su sucesor en Leyden, puesto que ocupará más tarde Paul Ehrenfest (1880-1933—. Finalmente, Einstein regresa a Zurich en agosto de 1912.

Ha dividido el tiempo entre problemas de diversa naturaleza, desde la mecánica estadística clásica hasta la desviación de la luz por la gravedad, aunque los problemas cuánticos son los que más le inquietan en este periodo. Sin embargo, ha avanzado considerablemente en su búsqueda de una generalización satisfactoria de la teoría de la relatividad. De regreso en Zurich se inicia una nueva y muy importante etapa en la construcción de la teoría de la relatividad general. Einstein induce a Grossmann a colaborar con él en la fundación de esta teoría; de esta colaboración, que tiene lugar durante los años de 1912 y 1913, emerge una nueva forma matemática de la teoría, la que está a la base de todos los desarrollos ulteriores, como veremos en la siguiente sección.

Tampoco la estancia en Zurich es larga, pues en 1913 Planck y Nernst visitan a Einstein en Zurich, para saber con qué interés consideraría una invitación a trabajar en Berlín, tal vez el centro más importante de la física de la época. La oferta es excepcional: se le nombraría miembro de la Academia Prusiana de Ciencias, se le daría un puesto de profesor en la Universidad de Berlín sin obligación de enseñar y se le ofrecía, además, la dirección del Instituto de Física Kaiser Wilhelm, que estaba por inaugurarse. Einstein

vio aquí la oportunidad de liberarse de todas las cargas académicas que tanto le pesaban y aceptó. 2 Los Einstein se trasladan a Berlín en abril de 1914. Sin embargo, las relaciones con Mileva se habían deteriorado mucho en los años precedentes —básicamente por incompatibilidad de caracteres— y ella prefirió retornar con los niños a Zurich.

Es en Berlín donde Einstein da forma acabada a la teoría de la relatividad, en noviembre de 1915; pero no por ello abandona los problemas cuánticos, a los que dedica parte de su tiempo. La primera Guerra Mundial ha estallado, pero su nacionalidad suiza le permite continuar con sus labores. En 1916 publica su primer libro, *Sobre la teoría especial y general de la relatividad*, y en 1917 produce la primera cosmología relativista. Finalmente, el esfuerzo sostenido de los últimos años acaba por vencerlo y Einstein enferma seriamente de úlcera estomacal y del hígado en 1917. Su prima Elsa Einstein (18761936), recientemente enviudada y madre de dos hijas, Ilse y Margot, lo atiende y ayuda. La relación termina en matrimonio en 1919. Einstein pasa una breve temporada en 1919 en la Universidad de Zurich, pero declina las ofertas insistentes y conjuntas de esta universidad y el ETH de retornar a esta ciudad. Este es el año de la coronación de Einstein: con la oportuna ayuda de un eclipse, Einstein se transforma, al terminar la guerra, en el científico más famoso de todos los tiempos.

LA MAYOR PROEZA

Cuando Einstein publicó su trabajo *Fundamentos de la teoría general de la relatividad* en 1916, el gran físico alemán Max Born (1882-1970) lo calificó como "la mayor proeza de la reflexión del hombre sobre la naturaleza; la más sorprendente combinación de penetración filosófica, intuición física y capacidad matemática". Einstein dedicó a esta proeza esfuerzos —que el mismo llegó a calificar de sobrehumanos en cartas a sus amigos— prácticamente ininterrumpidos desde 1911 hasta 1915, además del trabajo desarrollado a partir de 1907. Del principio de equivalencia de 1907 a la formulación final de 1915 hay una distancia enorme, que condujo a la teoría por rutas absolutamente nuevas para la física. Durante todos estos años, nadie fuera de Einstein se interesaba en esta teoría; para nadie tenía sentido este esfuerzo, pues no había nada que lo demandara. Una vez más encontramos a Einstein en una empresa solitaria. Y la firme guía que le conducía, capaz de permitirle realizar este tenaz y agotador esfuerzo, era sólo la profunda y muy íntima convicción de la necesidad lógica de esta teoría. No sólo era necesario generalizar el principio de la relatividad a todo tipo de movimiento, sino que era claro que la ley de la gravitación universal de Newton es una ley empírica, no deducida de primeros principios y que presupone, además, simultaneidad absoluta y acción a distancia. Seguramente era posible construir una teoría lógicamente simple, que fuera capaz de eliminar todas estas y muchas otras insuficiencias conceptuales y reflejara más fielmente la unidad intrínseca de la naturaleza.

El nuevo punto nodal que separa la forma inicial de la final de la teoría general tal vez se pueda encontrar en los trabajos realizados en Praga. Esencialmente, la consideración novedosa es ésta. Partimos de la convicción de que es tan natural demandar la validez del principio de relatividad para velocidades uniformes como para aceleraciones uniformes. Consideremos entonces su aplicación a un cuerpo que gira uniformemente; la contracción relativista de las distancias —*la llamada contracción de Lorentz* y que discutimos en el capítulo anterior— hace que la circunferencia cambie con el movimiento, pero no así el diámetro, que es perpendicular a la velocidad. Por lo tanto, el cociente entre estas cantidades deja de ser igual a π 3 ¡y pasa a depender de la velocidad! Esto significa que el sistema ya no satisface los principios de la geometría euclideana. La conclusión es inmediata: la elaboración de una teoría general de la relatividad requiere abandonar la geometría euclideana o, en palabras más llanas: espacio en que ocurren los fenómenos físicos no cumple las leyes de tal geometría. En sí misma, esta conclusión no es enteramente sorprendente, pues aunque los axiomas de la geometría euclideana han sido inspirados por la observación de lo que pasa en el mundo real y tienen por lo tanto un origen empírico, nada garantiza que entre la geometría así construida y el mundo material tenga que existir un paralelismo absoluto, pudiéndose dar desviaciones en condiciones apropiadas, por ejemplo, a escala cósmica.

Con Grossmann a su lado, Einstein encontró la oportunidad de penetrar en el terreno de las geometrías no euclideanas, encontrando que una forma particular de ellas, elaborada por el gran matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) más de cincuenta años antes, era especialmente adecuada para los propósitos de la relatividad. Cuando se dice, cómo es común oír, que el espacio es curvo de acuerdo a la relatividad, lo que se está implicando es que en una región del espacio en que hay campos gravitatorios no se cumplen las leyes de la geometría de Euclides, sino las de la geometría de Riemann.

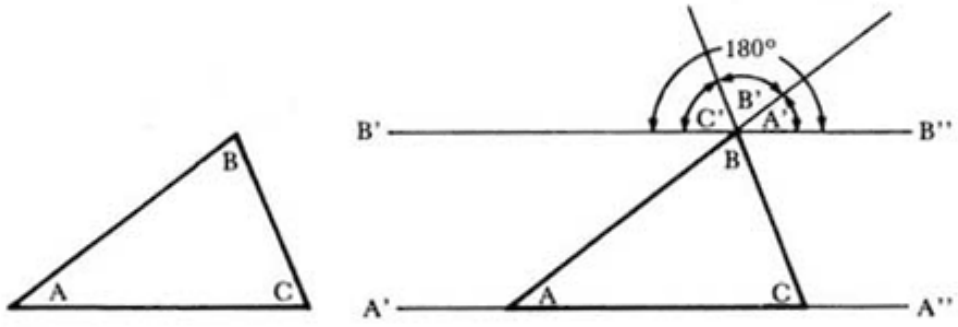


Figura 2. Los ángulos de un triángulo suman 180°. Los tres ángulos internos de un triángulo cualquiera se han denominado con las letras A, B y C. En la figura de la derecha se muestra el mismo triángulo y algunas rectas auxiliares; las rectas A´ A´´ y B´ B´´ son paralelas. Aplicando algunas reglas sencillas de la geometría comprobamos que los ángulos A´, B´, y C´ son iguales a los ángulos A, B y C, respectivamente; luego A+B+C=A´+B´+C´=180°.

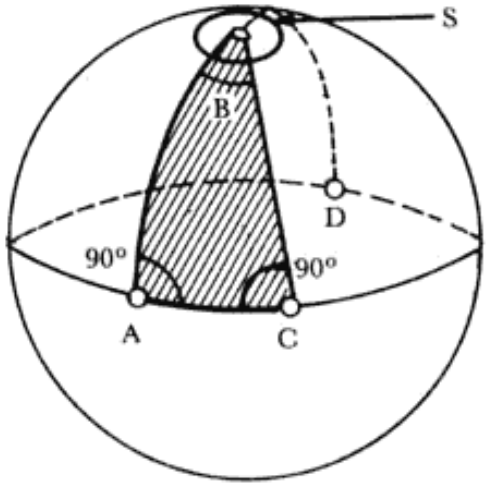


Figura 3. Un ejemplo de geometría no euclideana. La figura achurada es un triángulo esférico, construido sobre la superficie de una esfera, sin salirse de ella. La curva S encierra un círculo muy pequeño alrededor del Polo Norte: se observa que está constituido casi sobre un plano, por lo que cumple muy aproximadamente las leyes de la geometría euclideana. Pero la circunferencia sobre el ecuador ACDA tiene como diámetro al arco ABD, que mide media circunferencia, por lo que el cociente circunferencia/diámetro vale 2, resultado muy diferente de π .

LA GEOMETRÍA DEL MUNDO

La geometría euclideana es la que se obtiene operando con barras rígidas en un plano. Una construcción típica de esta geometría se representa en la figura 2 (a), que muestra un triángulo con ángulos internos A, B y C; la figura 2 (b) nos permite demostrar que la suma de los tres ángulos es siempre igual a 180°. Este

resultado constituye un típico *teorema* de la geometría euclideana. 4 Por lo tanto, para saber si esta geometría se cumple o no en la realidad, todo lo que tenemos que hacer es construir un gran triángulo y medir sus tres ángulos internos para ver si suman 180° o no. Si hacemos el experimento sobre una hoja de papel, pronto nos convenceremos de que la geometría de Euclides se aplica. Pero de lo anterior se infiere que si hiciéramos este experimento a escala cósmica trazando el triángulo, por ejemplo, con haces de luz que los campos gravitatorios curvarían, el resultado sería diferente.

Una forma simple de visualizar la geometría de Riemann se obtiene al pensar en las relaciones geométricas que ocurren en la superficie de una esfera *sin abandonar nunca la superficie.* Así, una recta sobre la esfera es un arco de círculo máximo (es decir, cuyo plano pasa por el centro de la esfera). Tomemos ahora el pequeño círculo trazado sobre la esfera muy cerca del Polo Norte, e indicado como S en la figura 3; si el círculo es suficientemente pequeño se encuentra prácticamente sobre un plano y se aplica la geometría de Euclides; luego la razón de su circunferencia a su diámetro es π. Sin embargo, tomemos como circunferencia al ecuador, ACDA; el diámetro es la "recta" ABD que es igual a media circunferencia, según se ve en la misma figura 3. Luego, en este caso, la razón de la circunferencia al diámetro es 2. Vemos que para los seres bidimensionales que viven sobre una esfera la razón de la circunferencia al diámetro depende del tamaño del círculo y está comprendida entre 2 y 3.1415... Pero precisamente esto es lo que necesitamos en la relatividad: una relación no fija (que pueda depender de la velocidad y de los campos externos por el principio de equivalencia) y normalmente menor que π. Por esta razón la geometría de Riemann resultó apropiada para la teoría de la relatividad.

Veamos ahora qué sucede con un triángulo sobre la esfera, como el ilustrado en la misma figura 3, con ángulos A, B y C y achurado; por construcción, hemos hecho los ángulos en A y en C de 90º cada uno, es decir, trazados con perpendiculares al ecuador. De la figura es claro que podemos hacer el gajo achurado más o menos ancho, según deseemos; en particular, lo podemos tomar tan angosto que el ángulo en el vértice B se reduzca a cero. En este caso, la suma de los ángulos internos será de 90 + O + 90 =180°. Pero también podemos abrir el gajo tanto como sea posible; si le hacemos dar la vuelta completa, el ángulo en B aumenta hasta 360° y la suma de los tres ángulos resulta 90 + 360 + 90=540°s. Vemos que para los esferícolas el teorema del triángulo dice que *la suma de los tres ángulos internos de un triángulo esta comprendida entre 180 y 540 grados.* Este resultado nos ayuda a comprender qué tan diferente puede ser la geometría del mundo real de la geometría euclideana.

LOS TRES EFECTOS CRUCIALES

Acabamos de describir una de las propiedades más interesantes de la relatividad general. Vimos que en la teoría especial longitudes y tiempos dependen de la velocidad; ahora, más en general, vemos que dependen del movimiento acelerado, y, por lo tanto, de los campos en que se encuentran los cuerpos (por el principio de equivalencia). En esta forma, *aun* la estructura del espacio y el fluir del tiempo resultan depender de la materia que contiene dicho espacio, pues ella es la generadora de los campos (y los movimientos). Todo esto conduce a efectos que podemos medir, para verificar o falsificar la teoría. Veamos aunque sea muy brevemente los tres más famosos.

Vimos antes cómo desde 1907 Einstein notó que la teoría de la relatividad implica que la luz es desviada por la gravitación, pero consideró el efecto inobservable. En Praga corrigió esta última consideración, al notar que un haz de luz que pasa rasante por el disco solar, será desviado un ángulo pequeño, pero medible. Por lo tanto, una estrella que se encuentre muy cercana al Sol aparecerá ligeramente desviada de la posición que le atribuimos cuando el Sol se encuentra lejos (Figura 4). Einstein hizo ver que este fenómeno sería en principio observable durante un eclipse solar, pues al quedar tapada la luz directa del Sol podremos ver la estrella cercana al Sol y medir su desviación. El experimento se llevó a cabo, pero sobre de ello hablaremos más adelante.

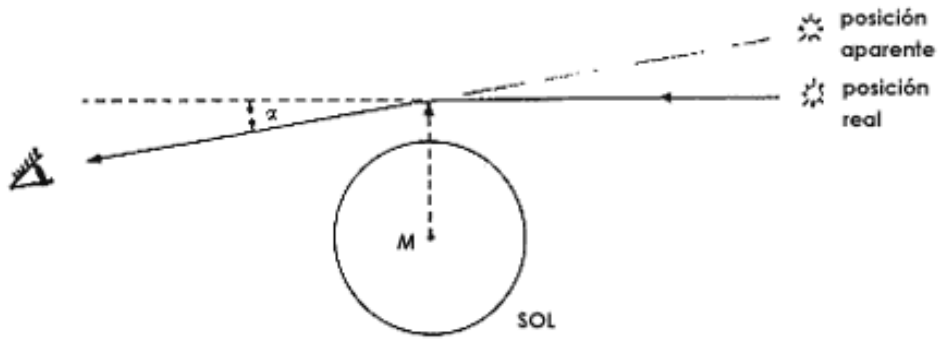


Figura 4. Desviación de un rayo luminoso por el Sol. Al desviar el Sol un haz de luz rasante que viene de una estrella lejana, cambia la posición aparente de está. El fenómeno se puede observar cuando la Luna oculta al Sol y obscurece el cielo. La figura está considerablemente exagerada (el ángulo α de desviación producido por el Sol es aproximadamente de 1/2000 de grado).

Un segundo efecto significativo predicho por la relatividad general, y que también ya hemos mencionado, es el que se refiere al corrimiento de la luz hacia el rojo debido a la acción de campos gravitatorios intensos. En 1925 este efecto fue observado por el astrónomo norteamericano Walter Adams en una estrella enana blanca (que es un tipo de estrella muy pequeña, pero muy masiva, por lo que posee un campo gravitatorio mucho más intenso que el solar), mientras que el correspondiente efecto producido por el Sol, mucho más débil, se logró observar durante la década de los sesentas.5

Lo que más entusiasmó a Einstein de su teoría general fue, sin embargo, otro aspecto. Al aplicar la teoría al caso del sistema planetario, observó que en vez de la órbitas elípticas que predice la teoría de Newton, la relatividad produce una especie de rosetas, es decir, elipses cuyo eje va girando con, el tiempo (Figura 5). La rotación del eje predicha por la teoría es muy pequeña, pero resultó ser exactamente la necesaria para resolver un problema centenario. Desde Kepler se sabe que los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol; con la teoría de la gravedad de Newton fue posible calcular no sólo estas órbitas, sino incluso las desviaciones —en general muy pequeñas— que deben ocurrir debido a la constante perturbación que los otros cuerpos celestes, como los grandes planetas, producen. Los cálculos dieron resultados excelentes; los cielos se mueven conforme a las leyes de Newton. Sólo había una excepción: Mercurio, el pequeño planeta más próximo al Sol, tenía una órbita que se desviaba, lenta pero sistemáticamente, de lo calculado.6

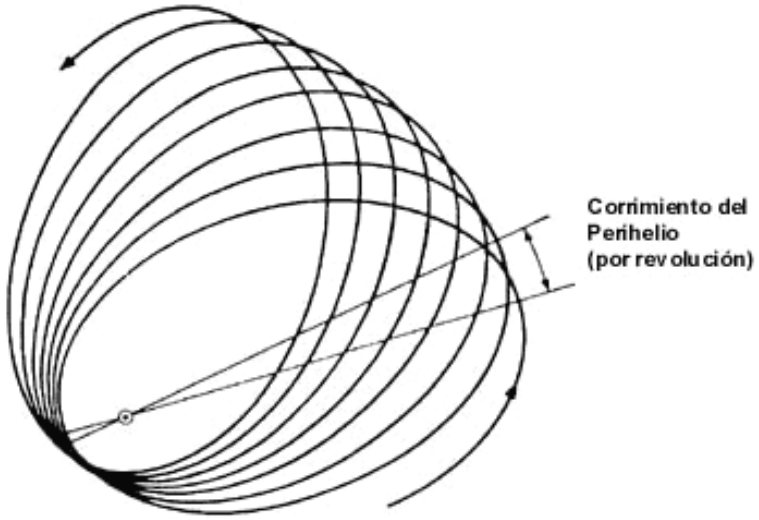


Figura 5. Precesión del perihelio de un planeta. La teoría general de la relatividad predice que la

elipse descrita por una órbita planetaria va girando muy lentamente en su plano, de tal manera que al completarse una vuelta, el eje mayor apunta en una dirección un poco diferente. En la figura se muestra el fenómeno en forma muy exagerada.

Esfuerzos se hicieron, durante casi dos siglos, para explicar este fenómeno, pero sin éxito. Cuando Einstein aplicó sus métodos al caso de Mercurio el misterio quedó aclarado: esta desviación observada a lo largo de los siglos no era otra cosa que la rotación del eje de la elipse predicha por la relatividad general —para los otros planetas del Sistema Solar la desviación es insignificante—. La coincidencia numérica fue excelente: después de todo, los cielos se mueven conforme a las leyes de Einstein.

Regresemos al tema de la desviación de la luz por la gravedad. Cuando Einstein aplicó su teoría final a este problema, obtuvo un resultado inesperado: la desviación resulta ser el doble de la que sus versiones anteriores indicaban. Es decir, aparecía la desviación puramente newtoniana, debida al "peso" de la luz, pero también otra de igual magnitud y puramente relativista (*o postnewtoniana*) debida a la curvatura del espacio inducida por la presencia del Sol. Einstein insistió entonces en la posibilidad de edificar su teoría en un próximo eclipse solar. Europa se encontraba en guerra y no fue posible llevar adelante esta tarea pronto, pero aun así la Real Sociedad Astronómica de Londres organizó un par de expediciones para aprovechar el eclipse solar del 29 de mayo de 1919. Una expedición fue dirigida por el físico y astrónomo inglés Arthur Eddington (1882-1944) y trabajó en la Isla Príncipe en el Golfo de Guinea, mientras que la otra, dirigida por el astrónomo Andrew Crommelin, operó en Sobral, Brasil. Se tomaron fotografías de las estrellas en la región ocupada por el Sol durante el eclipse y varios meses antes; la comparación entre ellas mostró una desviación de las estrellas brillantes cercanas al Sol, igual a la predicha por Einstein. 7

En noviembre de 1919 la prensa de todo el mundo publicó la noticia. Einstein se transformó de la noche a la mañana en un segundo Newton, o más aún, en el científico que superó a Newton, y fue consagrado por la prensa y la opinión pública como el científico más popular de todos los tiempos. Aunque no sin emoción, cuando Einstein supo por un telegrama de Lorentz que los resultados de las expediciones iban por buen camino, su primera reacción fue comunicarlo a su madre mediante una tarjeta postal. Desafortunadamente, la madre no logró gozar mucho tiempo del triunfo inmenso de su hijo, pues murió en marzo de 1920, precisamente en casa de él, a donde, ya muy enferma, se trasladó para morir a su lado.

La enorme popularidad que alcanzó Einstein, combinada con su abierta vocación antimilitarista y pacifista y su defensa de los derechos judíos, despertó reacciones muy variadas. 8 Trágicamente, una de las más inmediatas fue la de hostilidad en base al antisemitismo que el ambiente político de la Alemania de 1920 ya alimentaba. En febrero de este año, durante una conferencia de Einstein en la Universidad de Berlín, se desataron violentos desórdenes de origen antisemita, y en agosto del mismo año se organizó un mitin en la más grande sala de conciertos de la ciudad para atacar la teoría de la relatividad, por tratarse de ciencia judía. Este tipo de manifestaciones y persecuciones se continuaron y profundizaron durante el ascenso del nazismo, y son las que obligaron finalmente a Einstein a abandonar la Alemania nazi en 1933, pese a su promesa a Planck de no dejar Berlín mientras fuera posible resistir.

EINSTEIN ITINERANTE

Para colaborar a la recolección de fondos para la construcción de la Universidad Hebrea de Jerusalén, Einstein viaja junto con Chaim Weizmann (1874-1952) —fundador del Estado de Israel y su primer presidente— a los Estados Unidos de abril a mayo de 1921. Éste fue su primer viaje a ese país y lo aprovechó al máximo para realizar actividades científicas. Un año después acepta figurar como miembro del Comité de Cooperación Intelectual de la Sociedad de Naciones —el organismo internacional que en aquella época desempeñaba el papel que hoy corresponde a las Naciones Unidas— y, a pesar de que Alemania no era miembro de la Sociedad, conservaría su cargo hasta 1932. En junio de 1922 es asesinado su amigo, el Ministro de Asuntos Exteriores, 9 como resultado del clima de violencia que se extiende en Alemania.

Einstein entiende que su vida esta en peligro y decide alejarse un tiempo; hace un largo viaje por el

Oriente, incluyendo Japón (octubre de 1922 febrero de 1923). Durante el recorrido se le informa que se le ha otorgado el premio Nobel de física (correspondiente a 1921) "por sus servicios a la física teórica y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico": ni la teoría de los fotones ni la relatividad fueron razones suficientes, aun en 1922, para otorgarle el premio Nobel. Pero cuando Einstein dio su conferencia Nobel en Goteburgo, Suecia, en julio de 1923 —precisamente en los días en que Compton mostraba en forma definitiva la validez de la teoría de los fotones propuesta desde 1905—, seleccionó la teoría general de la relatividad como tema. Es interesante señalar que el dinero del premio ya Einstein lo tenía comprometido (desde 1919 cuando se divorciaron) con Mileva Maric para la atención de los hijos. En 1925 Einstein hace otro largo viaje, esta vez por América del Sur.

Durante estos años se ha ocupado de la teoría cuántica y ha empezado a investigar en una nueva dirección, más ambiciosa aún que la relatividad: la teoría unificada de campo; ya tendremos oportunidad más adelante de hablar algo sobre estos temas. Asimismo, Einstein realizó en esta época una serie de trabajos experimentales y obtuvo un número considerable de patentes, especialmente en colaboración con el físico y biofísico húngaro Leo Szilard, (l898-l964) —a quien reencontraremos más adelante desempeñado un papel muy interesante en la vida de Einstein—. Incluso se ocupó de desarrollar un amplificador acústico para ayudar a una amiga cantante que estaba perdiendo el oído.

NOTAS

1 Se trata del electrómetro propuesto en el artículo número 23 citado en el Apéndice I, que no pudo desarrollar en Berna por falta de condiciones.

2 La dirección del Instituto era una tarea relativamente simple, pues en sus años iniciales —los que le corresponderían a Einstein— tendría como tarea básica otorgar becas de estudio.

3 Se recuerda al lector que el número π **=3.14159**... es definido precisamente como el conciente entre la circunferencia y su diámetro. La geometría usual (llamada euclideana por su primer expositor sistemático, el matemático griego Euclides) demuestra que esta razón es la misma para todos los círculos, y es costumbre universal llamarle a esta constante con la letra griega pi.

4 *Un teorema* es una verdad que se demuestra mediante argumentos lógicos a partir de los axiomas. Los axiomas son verdades que se aceptan *a priori*, es decir, son los postulados.

5 Recientemente (1971) se realizó otro tipo de experimentos para observar la dilatación relativista y gravitacional del tiempo. comparando la marcha de dos relojes atómicos iguales, uno en reposo en la Tierra y el otro circunvolándola a 10 000 m de altura, transportado en un jet comercial. Los resultados experimentales coinciden excelentemente con las predicciones de la teoría, tanto para vuelos E-W como W-E.

6 Este fenómeno se conoce con el nombre de *corrimieno del perihelo.* El perihelio es el punto de la órbita de un planeta más próximo al Sol. El fenómeno es sumamente pequeño — 43 segundos de arco en un siglo para Mercurio, que es el caso más notable— pero medible porque sus efectos se acumulan con el tiempo.

7 La predicción de Einstein era que las estrellas deben desviarse un ángulo de 1.75 segundos de arco; la desviación puramente newtoniana es igual a O.85". Las mediciones en Sobral dieron el resultado 1.98 ±;1; O.12",.mientras que las de Isla de Príncipe arrojaron el valor 1.61 ± 0.3". Tres años después observaciones de otro eclipse desde Australia dieron el resultado 1.72± 0.11".

8 Einstien recalcó en un artículo suyo publicado en el Times de Londres el 28 de noviemmbre de 1919 la

importancia moral y política que tenía el hecho de que científicos ingleses hubieran realizado el esfuerzo de comprobar la teoría de un físico alemán, cuando sus respectivos países se encontraban en guerra.

9 Se trata de Walther Rathenau. Einstein le había aconsejado que no aceptara el puesto de Ministro, pues "los judíos peligran en posiciones tan altas."

IV. LA POLÉMICA BOHR-EINSTEIN

Estos cincuenta años de reflexión

concienzuda no me han llevado

más cerca de la respuesta a la

pregunta, ¿qué son los cuantos de luz?

Hoy día todo Juan, Pepe o Pancho

cree que sabe, pero está equivocado.

Sigo creyendo en la posibilidad de

construir un modelo de la realidad,

es decir, de una teoría que represente

las cosas en sí mismas y no sólo la

probabilidad de su ocurrencia.

A. EINSTEIN

LA MECÁNICA CUÁNTICA

SE CONSIDERA que en 1925-1926 quedó constituida la mecánica cuántica en la forma en que hoy la conocemos. En este capítulo tendremos oportunidad de estudiar una nueva faceta de Einstein estrechamente vinculada con las teorías cuánticas. Para facilitar la lectura, revisaremos primero, aunque muy someramente, cómo se llegó a esta teoría y en qué consiste.

Hacia 1911 el extraordinario físico experimental británico de origen neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) había llegado a la conclusión de que los átomos tienen una estructura similar a la de un sistema planetario en miniatura —ésta es la imagen usual que vemos en los textos elementales y las películas de ciencia ficción—: que están formados por un núcleo pequeñísimo y los electrones se encuentran orbitando alrededor de él. Como el átomo es eléctricamente neutro, el núcleo tiene una carga positiva tal que neutraliza la carga negativa de los electrones; esta carga se debe a los protones que contiene. Como los electrones son sumamente ligeros (1 840 electrones tienen una masa aproximadamente igual a la de un solo protón), prácticamente toda la masa del átomo está concentrada en el núcleo. Pero explicar las propiedades de estos átomos fue una tarea que demandó el esfuerzo continuado de muchos investigadores —incluidos prácticamente todos los grandes físicos del periodo— durante muchos años.

No podemos narrar aquí la complicada historia de la teoría cuántica, es decir, de la teoría de los átomos y sistemas compuestos por ellos. 1 Bástenos decir que se inicia con un modelo muy simple, pero audaz, propuesto por el físico danés Niels Bohr (1885-1962) en 1913, capaz de predecir muchas propiedades del átomo de hidrógeno, aunque inadecuado para ir más lejos. A partir de los trabajos de Bohr se inicia una búsqueda que culmina en una teoría propuesta por el joven físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976) en 1925 y desarrollada de inmediato por Max Born y su joven asistente, el matemático Pascual Jordan

(1902-1984). Paralelamente se desarrolla otra dirección independiente de investigación, surgida de una proposición del físico francés Louis de Broglie (1892-), en la que Einstein tiene una intervención decisiva y la que es llevada a sus últimas consecuencias por Erwin Schrödinger (físico austriaco, 1887-1961). Este esfuerzo culminó en 1926 con una versión diferente, pero equivalente a la anterior, de la mecánica cuántica. Finalmente, el joven físico inglés Paul Dirac (1902-1984) reformuló matemáticamente en 1926 las teorías disponibles y les dio la forma de la actual mecánica cuántica, aunque fue Niels Bohr quien contribuyó más decididamente a darle su contenido interpretativo actual.

Vamos a repasar ahora algunas de las propiedades más importantes y características de los sistemas cuánticos —como podrían ser átomos, moléculas, cristales, o incluso estructuras más complejas constituidas por estos elementos, pero normalmente de tamaño microscópico—.

LAS PROPIEDADES DISCRETAS

La que tal vez constituye la característica más general de los sistemas cuánticos, es que algunas de sus propiedades pueden tomar sólo valores discretos, discontinuos. Ésta fue la propiedad que descubrió Planck en lo que se refiere a la energía intercambiada entre el campo electromagnético y las paredes de la cavidad y que fue reinterpretada por Einstein como producto de que las partículas que componen al campo poseen precisamente la energía ***hf*** cada una. Como vimos, Planck usó esta propiedad para introducir el término *quanto*, de donde se deriva el nombre de la teoría. Como un análogo que puede servir para aclarar las ideas, es posible pensar en los sonidos producidos por un piano: podemos producir una nota, o la siguiente, o la siguiente, y así sucesivamente, pero no podemos producir *ningún* sonido entre dos notas: decimos que los sonidos del piano tienen un espectro discreto, discontinuo; es la forma convencional de referirnos a esta propiedad.

El hecho de que la energía de los electrones de un átomo sea discreta es muy importante; esto significa, por ejemplo, que el tamaño de todos los átomos de hidrógeno en su estado normal, es el mismo: no hay átomos de H chicos y grandes: todos son iguales y tienen el mismo tamaño y las mismas propiedades. Sin embargo, si calentamos el H o le suministramos energía en cualquier otra forma, algunos átomos absorberán una parte de la energía en exceso, otros otra parte y así sucesivamente, y aparecerá toda una serie de valores discretos posibles de energía, como las notas del piano. Ahora, cuando se enfría este H los átomos empiezan a emitir la energía que les sobra, saltando de una energía a la otra; como la energía se conserva en éstos saltos —como en cualquier fenómeno natural— *la diferencia* de las energías entre las órbitas inicial y final aparece en la forma de un fotón, lo que podemos escribir como sigue:

$$h\,f = E_{orb.\ inicial}\ E_{orb.\ final} \qquad \textbf{(1)}$$

Esta fórmula nos muestra algo sumamente importante: la radiación electromagnética emitida por los átomos al enfriarse, tiene frecuencias, es decir, colores, perfectamente definidos, que forman un espectro discreto. De hecho, estamos narrando la historia al revés: lo primero que se descubrió es que cada elemento posee un espectro de emisión discreto que le es característico —algo así como su huella digital electromagnética— y sólo muchas décadas después Bohr pudo explicar este hecho con la fórmula anterior, que resultaba de su teoría.

Ahora bien, la mecánica cuántica no describe en detalle cómo se realizan estos saltos.[2] Como, por otra parte y según veremos más adelante, la noción de trayectoria tampoco es propia de esta teoría, con frecuencia se supone que los saltos cuánticos se realizan en forma instantánea, sin que "exista" ni "pase" nada intermedio. No se asuste el lector: todavía tendrá ocasión para las sorpresas.

LAS PROPIEDADES ONDULATORIAS

Vimos como en su ponencia de Salzburgo en 1909 Einstein avanzó una profética observación: la descripción de los sistemas cuánticos tendría que incorporar tanto aspectos corpusculares como ondulatorios. El darle forma definida a esta hipótesis fue el gran descubrimiento de Louis de Broglie, 3 quien en 1923 y después en su tesis doctoral de 1924 propuso la idea de que a todo movimiento es necesario asociar una onda, y dio una fórmula para hacerlo. A partir de este descubrimiento de De Broglie pronto se construyó la llamada *mecánica ondulatoria*, que es una de las versiones originales de la mecánica cuántica. Esto quiere decir, por ejemplo, que un electrón bajo ciertas condiciones se comporta como un corpúsculo (por ejemplo, en el efecto Compton, es decir, cuando choca con un fotón), pero que en otras circunstancias se puede comportar como una onda (por ejemplo, en el microscopio electrónico).

Einstein mismo avanzó considerablemente en esta dirección, hecho que es poco conocido. En 1925 preparó un trabajo, estimulado por las novedosas y atinadas observaciones del físico indio Satyendra Bose (1894-1974), en el cual se muestra que sistemas cuánticos, como los gases, no deben describirse usando métodos estadísticos clásicos (los de Maxwell y Boltzmann), sino con la ayuda de una nueva estadística de tipo cuántico (y que hoy se llama de Bose-Einstein). Para estudiar estos gases cuánticos, Einstein regresó a su viejo método de 1909 de las fluctuaciones y encontró que para obtener los resultados correctos, a las fluctuaciones de la energía producidas por el movimiento de las moléculas del gas tenía una vez más que agregar un término adicional, ahora idéntico al producido por la interferencia de ondas clásicas como la luz. Así, Einstein cierra elegantemente un círculo lógico abierto 20 años antes: tanto para la descripción del campo electromagnético, como para la de las moléculas, se requieren simultáneamente términos corpusculares y ondulatorios. Einstein señala que esta conclusión es más que una mera analogía y menciona que ha conocido en esos días la proposición de De Broglie —Paul Langevin (físico francés, 1872-1946) le había enviado una de las copias de la tesis—. Concluye que un campo ondulatorio debe estar conectado a cada cuerpo en movimiento en forma análoga a como el campo ondulatorio óptico está conectado con el movimiento de los cuantos de luz; seguramente, sugiere, este fenómeno ondulatorio se podría observar mediante fenómenos de difracción. 4 Anota entonces algunas características de está onda y aplica la idea al estudio de ciertas propiedades térmicas de los gases. Esta onda de Einstein es la que unos meses después toma Schrödinger como base para construir la versión ondulatoria de la mecánica cuántica.

Las propiedades ondulatorias de los electrones son extraordinariamente importantes. Por ejemplo, ellas indican que los electrones pueden comportarse como si fueran ondas bajo ciertas circunstancias, pero en otras como si fueran corpúsculos. A esto se refiere uno cuando se habla de la dulidad *onda-corpúsculo.* También es característico de los sistemas cuánticos que nunca se observan las propiedades ondulatorias y las corpusculares juntas:se manifiesta una o la otra. A esto se hace referencia diciendo que ambas propiedades son *complementarias.* La interpretación física que usualmente se da a estos hechos es la siguiente. Cuando el electrón se comporta como corpúsculo se encuentra esencialmente localizado en un punto; pero cuando el electrón se manifiesta como una onda se encuentra distribuido en todo el espacio ocupado por a onda. Que se manifieste en una u otra de estas formas depende de la situación específica, por lo que el experimentador está en condiciones de inducir la manifestación de uno u otro aspecto, si lo desea.

LAS PROPIEDADES ESTADÍSTICAS

Pero las propiedades extrañas de los objetos cuánticos aún no se han agotado. Veamos otra, también de primera importancia. La onda que introdujeran De Broglie, Einstein y Schrödinger para describir los electrones nos permite hacer predicciones sobre su comportamiento estadístico, pero no predecir con detalle cómo se va a comportar cada electrón. Veamos esto más de cerca con un ejemplo. Supongamos que resolvemos un problema cuántico, es decir que determinamos la onda que lo caracteriza (a la que se le llama *función de onda*) y que esta onda resulta muy grande en ciertas regiones A, B, C..., del espacio, pero despreciable en los otros lugares. Si ahora hacemos el correspondiente experimento, encontraremos que hay muchos electrones en las regiones A, B, C... ., y ninguno en otra parte; es más: notaremos que donde

la onda es de mayor amplitud hay más electrones y menos donde la amplitud es menor. Así descubriremos pronto (como en su día lo hizo Born) que la probabilidad de que los electrones lleguen a una región dada está determinada por el cuadrado de la amplitud que tiene la onda en esa región del espacio.

Pero ahora nos hacemos una pregunta no menos interesante, ¿qué pasa si lanzo un solo electrón? ¿A dónde va a parar? El punto está en que la mecánica cuántica sólo me permite hacer una predicción probabilística. Si hago el *mismo* experimento una y otra vez y coloco detectores apropiados en las distintas regiones del espacio para saber a cual de ellas llega el electrón en cada ocasión, notaré que a veces llega a A, a veces a B, otras a C, etc., llegando más frecuentemente a la región que tenga mayor probabilidad, menos a la de menor probabilidad, y así sucesivamente. Y aunque las respectivas probabilidades las puedo calcular correctamente, ellas no me permiten decir en el caso de que lance un electrón adónde exactamente va a ir a parar. La teoría describe eventos individuales sólo en el sentido estadístico que acabamos de exponer.

LAS PROPIEDADES INDETERMINISTAS

Y ahora algo aún más sorprendente. Retornamos a la serie de experimentos del párrafo anterior, y observamos que en cada ocasión el electrón cae en otro punto. Pero, ¿acaso los experimentos no eran exactamente iguales? Entonces ¿no el resultado debía ser también exactamente el mismo? Cuidado: la afirmación de que en condiciones iguales se obtienen resultados iguales es válida en la física clásica, pero *no en la cuántica*. Estamos en presencia de lo que convencionalmente se llama el *indeterminismo de los sistemas cuánticos.* En palabras llanas, esto lo podemos expresar como sigue. Si en condiciones dadas un electrón —o cualquier sistema cuántico— puede responder produciendo diversos resultados, en cada caso particular dará uno de ellos en forma totalmente impredecible y azarosa. Lo más que podemos determinar es con que probabilidad hará una u otra cosa, pero no si hará eso o aquello. Un ejemplo adicional ayudará seguramente a precisar mejor las ideas. Pensemos en un átomo radiactivo; la mecánica cuántica nos permite calcular su vida media, pero no nos permite predecir en qué momento preciso se producirá el decaimiento, pese a que sí es posible determinar experimentalmente este momento, por ejemplo, mediante un detector Geiger; además, observamos que diversos núcleos *iguales* decaen en momentos *diferentes.* Queda un poco el sabor de que el sistema cuántico posee su dosis personal de libre albedrío.

Esta peculiaridad cuántica está a la raíz de una característica de la teoría que mencionamos antes: en la mecánica cuántica, concepto de trayectoria no existe. La razón es la siguiente: las propiedades de los sistemas cuánticos no están en general bien definidas, por lo que usualmente pueden tomar cualquier valor concreto de entre muchos posibles (hemos visto que esto ocurre controlado por las leyes del azar). Podemos, si así lo deseamos, ingeniarnos para fijar el valor de cualquiera de estas cantidades, por ejemplo la posición, o la velocidad, etc., según nos convenga, y esto define el estado del sistema. Sin embargo, no es posible fijar todas las propiedades simultáneamente en ningún sistema cuántico. Más aún: también sucede que cada vez que fijamos una cantidad, impedimos con ello que otras queden fijas. Por ejemplo, si procedemos para fijar la posición de un electrón, con esto su velocidad queda totalmente indeterminada, y *viceversa*. Esto es lo que se conoce comúnmente con el nombre de *principio de indeterminación* (otros lo llaman *principio de incertidumbre*) y en su forma básica fue establecido por Heisenberg y se le considera uno de los principios centrales de la mecánica cuántica.

Regresemos ahora al asunto de las trayectorias. La trayectoria recorrida por un cuerpo no es sino una lista de la velocidad conque se mueve en cada punto. Pero precisamente la posibilidad de hacer esta lista es lo que nos prohibe el principio de Heisenberg, pues si conocemos con precisión la posición no conocemos la velocidad, y *viceversa*. Luego, no podemos definir ninguna trayectoria. La mecánica cuántica usual interpreta esto diciendo que la partícula no *sigue* ninguna trayectoria. El criterio filosófico que está a la base de esta afirmación es que sólo tiene existencia real lo que se observa. Nótese que este criterio es ajeno a la física clásica, la que no pone en duda la existencia de la cara oculta de la Luna.

LA INTERVENCIÓN DEL OBSERVADOR

El lector avispado replicará de inmediato mostrando una fotografía de una cámara de burbujas atravesada

por partículas; ahí se ven claramente dibujadas las trayectorias que siguieron los electrones y protones, etc., dentro de la cámara. No sólo sí hay trayectorias, sino hasta las podemos fotografiar, dirá. Pues sí, contestará un físico ortodoxo, pero otra vez está argumentando en forma clásica, no cuántica. Lo que pasa es lo siguiente: técnicamente hablando, en el momento en que se toma la fotografía se está haciendo una medición en el sistema. Pero todo sistema cuántico es perturbado por cualquier medición y cambia con ello su estado. En cada caso particular, la medición fuerza a que se defina una de entre todas las posibles velocidades, y ello da lugar a la trayectoria que se observa. Pero antes de hacer la medición —es decir, antes de tomar la fotografía— tal trayectoria no existía —a lo más existía potencialmente, como una entre millones—.

Esto nos recuerda algo que ya discutimos: el observador puede libremente escoger que el electrón se comporte como onda o como corpúsculo, simplemente cambiando la pregunta que hace: el electrón responderá apropiadamente. Es más, de acuerdo a la interpretación usual de la teoría no existe una barrera bien definida entre observador y sistema observado, por lo que la separación entre estas dos partes de la realidad es arbitraria y en ocasiones indebida. La presencia del observador afecta al sistema y es inseparable de la descripción, por lo que no es posible, *en principio*, hablar de propiedades definidas de un sistema que no es observado. Si no observo al sistema, todas las posibilidades coexisten; si lo observo, una de ellas se realiza, con lo que cambia su estado.

En los párrafos anteriores hemos descrito la interpretación usual de la mecánica cuántica, la que se conoce con el nombre de *interpretación de Copenhague* por estar basada en los puntos de vista desarrollados por Niels Bohr —quien trabajaba en esa ciudad, a la que convirtió con su presencia en centro de atracción de los físicos de la época—. También se le llama *interpretación ortodoxa*, basándose en el hecho de que es la interpretación (ampliamente) dominante, y dejando de lado el hecho de que es absolutamente heterodoxa desde el punto de vista del resto de la ciencia clásica. En todo lo que sigue, debe entenderse que es a esta interpretación, o variantes pequeñas de ella, a la que nos estamos refiriendo.

LA POLÉMICA BOHR- EINSTEIN

Einstein y Bohr se encontraron por vez primera durante una visita de éste a Berlín en junio de 1920; se vieron por última vez en abril de 1954, en Princeton, EUA. La relación entre ellos fue estrecha y de gran afecto y aprecio mutuo. Sin proponérselo, entablaron una polémica sobre la mecánica cuántica, que se prolongó hasta la muerte de Einstein en 1955. No fue ésta la única polémica de Einstein sobre este tema; por ejemplo, hubo otra —no exenta de toques personales que la hicieron dolorosa para ambas partes— con Born. Sin embargo, la polémica con Bohr fue indudablemente la más profunda y duradera, además de ser la más conocida —y excelentemente documentada por el propio Bohr—, por lo que prestaremos a ella nuestra atención. Adelantándonos un poco, podemos ilustrar la importancia que este debate tuvo para Bohr, recordando que el último dibujo que trazó en su pizarrón —la víspera de su muerte, ocurrida siete años después de la de Einstein—, fue el que Einstein le dibujara a él durante sus discusiones en el 6o. Congreso Solvay.

En octubre de 1927 se efectuó el 5° Congreso Solvay en Bruselas, al que asistieron todos los fundadores de la teoría cuántica: Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Born, De Broglie, Schrödinger, Dirac, Pauli, así como muchas de las grandes figuras de la física de la época, como Madame Curie, Lorentz, Ehrenfest, W. L. Bragg, Debye, Compton, etc. Es ahí donde se inicia el debate, cuando Einstein señala públicamente alguna objeción a la teoría recién propuesta; más aún, fuera de las sesiones mantiene continuas discusiones, muy particularmente con Bohr, que muestran su insatisfacción con la teoría. En el 6o. Congreso Solvay, realizado en 1930, Einstein discute un experimento pensado con el que intenta demostrar que es posible en principio violar las relaciones de Heisenberg; pero al día siguiente Bohr hacer ver que si se toman en cuenta efectos característicos de la teoría general de la relatividad, desaparece la violación y se recupera la descripción cuántica. A partir de este momento, Einstein acepta expresamente la *consistencia lógica* de la mecánica cuántica, pero no su *necesidad lógica*: su fino instinto le impide aceptar esta teoría como final, por lo que repetidamente señala que indudablemente ella recoge un pedazo de la verdad, pero que no es una teoría ni completa ni definitiva.

La polémica continuó pero cambió su forma, pues Einstein pronto se vio obligado a abandonar Alemania. En 1932 el Instituto de Estudios Avanzados que se estaba creando en Princeton, New Jersey, EUA, le ofrece un puesto de profesor, para compartir su tiempo en partes iguales entre Berlín y Princeton. Einstein acepta y en diciembre de ese año parte para su primera estancia en Princeton. Semanas después, el 30 de enero de 1933, Hitler toma el poder en Alemania: Einstein jamás volverá a pisar tierra alemana. Su casa de verano en las afueras de Berlín es cateada por la policía nazi en busca de armas del Partido Comunista. Para facilitar las cosas a sus amistades, Einstein renuncia a su puesto en la Academia de Ciencias. Al terminar su estancia en Princeton, Einstein regresa por algunos meses a Europa —los reyes Alberto y Elizabeth de Bélgica, con quienes estableció estrecha amistad a través de los Congresos Solvay, le dan hospedaje y protección— y en Zurich visita por última vez a su hijo Eduardo, ya enfermo. Recibe invitaciones de las universidades de Jerusalén, Leyden, Madrid, Oxford, París, etc.; aún en viaje, Einstein hace pronunciamientos políticos contra la guerra y por los intelectuales en exilio y se da tiempo para publicar un par de trabajos científicos y dar conferencias. Suspende sus pronunciamientos a favor de los objetores de conciencia, pues: "al poder organizado sólo se le resiste con poder organizado. Por mucho que me duela, no hay otra salida. " En octubre regresa a Princeton, para no abandonar más los Estados Unidos —salvo una breve salida a las Bermudas en 1935 para tramitar las visas de inmigrantes de la familia—, país que en 1940 le otorga la ciudadanía —junto con su hijastra Margot y su fiel secretaria Helena Dukas (1896-1982(, y sin él dejar su ciudadanía suiza—. Aquéllos fueron años difíciles para la familia: Ilse, la hija, murió en París en 1934; Elsa, la esposa, murió del corazón en diciembre de 1936; en 1939, Maja la hermana y su esposo Paul Winteler tienen que abandonar su casa en Florencia por la persecución racista del fascismo italiano; Maja va a Princeton a casa de su hermano y ya nunca más se podrá reunir con su esposo. Sin embargo, en lo general, en Princeton Einstein inició una nueva vida, apacible y tranquila.

Allí instalado y en colaboración con Boris Podolsky (1896-1966) y su joven asistente Nathan Rosen (1909-) publica un trabajo —conocido por las iniciales de sus autores como el *trabajo EPR*—, que demuestra que si se adopta un punto de vista objetivo claramente definido sobre la realidad física, entonces la mecánica cuántica es una teoría física incompleta, pues no puede contener *todos* los elementos de la realidad de interés para la descripción del sistema. Bohr se siente obligado a responder a este embate y, haciendo a un lado las investigaciones sobre física nuclear que lo ocupan, elabora una larga y detallada respuesta, encaminada a mostrar que el punto de vista sobre la realidad física defendido por EPR es inaceptable desde el enfoque de la mecánica cuántica.

Einstein perseveró hasta el final de su vida. Publicó versiones un poco modificadas del argumento EPR, escribió comentarios diversos sobre los problemas conceptuales inherentes a la mecánica cuántica desde su punto de vista; en sus notas autobiográficas (o su necrología, como él la llamara; véase la bibliografía) retoma decididamente el tema. Todavía en 1951 y 1953, a dos años de su muerte, escribió un par de ensayos (en homenaje a Born y De Broglie, respectivamente) insistiendo en sus objeciones a la mecánica cuántica.

EL PUNTO DE VISTA DE EINSTEIN:

UN EJEMPLO SENCILLO

En un contexto elemental y no técnico es muy difícil, si no imposible, analizar con detenimiento cuáles son los problemas que inquietan a Einstein y que le impiden aceptar la formulación a que la física ha llegado para describir los fenómenos cuánticos. Trataremos, sin embargo, de acercarnos un poco al problema mediante un ejemplo simple. Si el lector tiene alguna dificultad en entenderlo, puede seguir de frente sin grave riesgo de perder la continuidad.

Supóngase un núcleo radiactivo esférico que emite electrones (los que se, llaman rayos β en el lenguaje técnico). La mecánica cuántica describe los fenómenos, como ya hemos dicho, mediante una función matemática que se llama *función de onda*. En el presente caso, por ser esférico el núcleo, también lo será la función de onda, lo que significa que los electrones emitidos quedan descritos por una onda esférica. Sin embargo, con una cámara de burbujas o una película fotográfica observamos que los electrones emitidos

siguen trayectorias rectilíneas. ¿Cómo podemos hacer compatibles ambos resultados? La explicación usual que da la mecánica cuántica involucra lo que Heisenberg llamó *la reducción o el colapso del paquete de ondas,* un ejemplo del cual describimos en la sección sobre la intervención del observador. Según esta explicación, mientras no observamos el sistema, cada electrón está correctamente descrito por una onda esférica, pero al observarlo con la cámara de burbujas alteramos su movimiento, que ahora se hace rectilíneo. La función de onda, inicialmente esférica, se *colapsa* instantáneamente con la observación, para reducirse a una que corresponde a las trayectorias rectilíneas de los electrones.

La interpretación que Einstein propondría para este problema es totalmente otra. Al desintegrarse, unos núcleos emitirán el electrón en una dirección, otros en otra, y así sucesivamente; es claro que si el número de núcleos de que disponemos es suficientemente grande, veremos electrones emitidos en todas las direcciones con igual probabilidad. Einstein sostendría que la función de onda describe sólo esta situación, y no los casos individuales; lo que le pasa no *a un núcleo,* sino a un conjunto *estadístico* de núcleos iguales. Esta interpretación tendría la ventaja de resolver otro problema desde un punto de vista einsteiniano, pues no requiere del colapso de la función de onda. Este colapso es inaceptable desde el punto de vista de Einstein, pues, primero, es inconsistente con las leyes de la relatividad (se supone que ocurre instantáneamente); segundo, demanda una forma de acción a distancia muy peculiar, y tercero, no puede ser sujeto a verificación experimental, pues no es posible analizar un sistema no observado. La mecánica cuántica no ofrece entonces una descripción completa de la realidad física, pues se le escapa el evento individual, el cual se puede observar y tiene, por lo tanto, una realidad en sí mismo.

LA IRONÍA CUÁNTICA

Hemos visto a Einstein trabajar desde 1905 solo y a la vanguardia, tratando de vencer la resistencia de los físicos y convencerlos de la realidad de los cuantos del campo de radiación; lo hemos visto trabajar durante veinte años en la búsqueda de una teoría cuántica de la materia —alguna vez le dijo a Besso en una carta que a este problema le dedicó a lo largo de los años más tiempo que a ningún otro—. Y ahora, cuando todos los físicos consideran que han logrado construir esta teoría, Einstein vuelve a quedarse solo, navegando una vez más contra la corriente, pero siendo ahora él quien aparentemente se aferra al pasado y se niega a aceptar la nueva teoría con base en sus viejos principios. A Einstein se le acusó de no entender la mecánica cuántica y de conservadurismo; pero mantuvo sus objeciones hasta el final, realizando un esfuerzo perseverante para convencer a los físicos de la necesidad de revisar los principios en que descansa esta teoría. Profundamente convencido de la ilegitimidad de la nueva concepción de la naturaleza que se estaba desarrollando, Einstein se empeñó durante varios años en construir una alternativa a la mecánica cuántica. Sin embargo, sus esfuerzos no fructificaron; de hecho, nunca publicó nada al respecto y quedó impotente frente al desarrollo vertiginoso de la teoría cuántica; sus críticas se fueron relegando poco a poco.

Hay un principio rector en las críticas de Einstein a la mecánica cuántica. Esquemáticamente, lo podemos decir así: Einstein consideró que sólo puede ser aceptable una descripción de la naturaleza que reconoce en el mundo físico una realidad objetiva, externa a nosotros y que implica un comportamiento regido por leyes cognoscibIes que no contienen al azar como elemento esencial. Es esta actitud realista, objetiva y determinista de Einstein la que lo enfrenta a la nueva física, que ha roto con principios característicos de la ciencia a los que él no está dispuesto a renunciar. Por ejemplo, Einstein diría que si algo existe, esta existencia es independiente de si el sistema está bajo escrutinio o no. Al observador le corresponde descubrir e investigar los hechos de la naturaleza, pero no guiarlos con sus decisiones arbitrarias.

A Einstein le parecía asimismo inaceptable cualquier concesión respecto al determinismo. La mecánica cuántica no lo sorprendió desprevenido con este problema, pues ya se había topado con él desde 1916, cuando logró encontrar una nueva derivación de la fórmula de Planck, basándose en un estudio detenido de la absorción y emisión de luz por un átomo. En este famoso trabajo, Einstein se vio precisado a hacer un análisis estadístico y a introducir la noción de *transición espontánea,* es decir, transiciones atómicas cuánticas que ocurren sin causa aparente alguna. Su inquietud con estos resultados fue creciendo con el tiempo; por ejemplo, en 1920 (seis años antes del nacimiento de la mecánica cuántica) le escribió a Born

respecto a ellos: 'Me sentiría muy infeliz al renunciar a la causalidad completa." En efecto, el principio de causalidad ha sido esencial para la ciencia; este principio establece, en su versión más simple, que cada efecto tiene su causa, y la misma causa, en condiciones equivalentes, produce siempre el mismo efecto. Esto elimina al azar como *causa directa* 5 y permite la búsqueda de leyes definidas, es decir, de relaciones de causa a efecto que deben cumplirse estrictamente en cada caso particular. Toda la ciencia, salvo la física moderna, acepta este principio en forma irrestricta. Hemos visto que, sin embargo, la mecánica cuántica rompe con él al permitir la existencia de un indeterminismo característico en el comportamiento de los microsistemas, lo que conduce a que en condiciones iguales (o bien, a *causas iguales)* se observen resultados diferentes. Para Einstein esto era un indicio del carácter provisional de la actual mecánica cuántica. La actitud de la mayoría de los físicos fue la opuesta. Por ejemplo Born, en un trabajo publicado en 1926, toma una actitud contraria a la que Einstein le comentara en la carta antes citada y escribe: "Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, no existe cantidad que fije causalmente los efectos de una colisión en un evento individual... Yo en lo personal me inclino a renunciar al determinismo en el mundo atómico..."

Resumamos un poco. Desde el inicio, Einstein muestra su descontento con la mecánica que acaba de emerger; pronto se convence de la corrección lógica de esta teoría, pero mantiene sus críticas a ella, con base en el hecho de que la nueva teoría contiene elementos que le parecen inaceptables, desde un punto de vista *filosófico:* a) la teoría en su forma actual no permite una descripción realista (que correspondiera a un mundo objetivamente existente), sino que recurre a la intervención de un hipotético observador; b) tampoco da una descripción completa de un evento individual, sino meramente estadística, y c) asigna un papel fundamental al azar. Einstein considera como una cuestión de principio el que sea posible dar una descripción completa y acabada —y, por lo tanto, no estadística— y en términos objetivos de cualquier fenómeno físico y pone este principio por delante del conocimiento físico específico. Su conclusión es así natural: "La mecánica cuántica es muy impresionante. Pero una voz interna me dice que esto no es todavía lo auténtico. La teoría da mucho, pero difícilmente nos acerca al secreto del Viejo. De todas maneras estoy convencido que Él no juega a los dados." (En la carta a Born de diciembre de 1926, citada antes.)

En este problema Einstein no tuvo éxito: ni pudo construir una teoría mejor y más acorde a sus requerimientos filosóficos y físicos, ni logró convencer a los físicos de la validez de sus observaciones. Sin embargo, mantuvo perseverantemente sus argumentos y mostró algo extraordinariamente importante: para un creador de la profunda intuición física de Einstein existen grandes principios que deben ser respetados, incluso cuando parece ser que los hechos los contradicen; si este último es el caso, debemos ir más a fondo para encontrar la raíz de la aparente contradicción; no hacer los principios a un lado, al menos sin la necesaria resistencia. La actitud dominante en el ambiente físico ha sido mucho más pragmática: los principios generales han sido subordinados al conocimiento científico alcanzado.

En síntesis, los dos aspectos de la alternativa en discusión son éstos: por un lado, los enormes triunfos teóricos y prácticos de la teoría, aunado ello a su consistencia *interna* lógica; por el otro, puntos de principio insatisfactorios que señalan la existencia de dificultades conceptuales y que aparecen al confrontar esta teoría con el resto del conocimiento científico, o, si se prefiere, con una filosofía realista y objetiva de la naturaleza.

Aunque es usual considerar el problema que hemos discutido como resuelto a favor de la mecánica cuántica y, por lo tanto a favor de Bohr en su disputa con Einstein, tenemos que dejar al tiempo que diga la última palabra. Viene al caso citar un párrafo que Einstein escribiera a Born en septiembre de 1944:

"Nos hemos convertido en antípodas en lo que se refiere a nuestras expectativas científicas. Tú crees en el Dios que juega a los dados, yo en un orden y una legalidad completas en un mundo que existe objetivamente, y que yo he tratado de capturar mediante recursos harto especulativos. Yo *creo* firmemente, pero espero que alguien descubrirá un camino más realista, o tal vez una base más tangible que la que la suerte me ha permitido encontrar. Aun el gran éxito inicial de la teoría cuántica no me hace creer en este

juego de dados fundamental, aunque soy perfectamente consciente de que nuestros jóvenes colegas interpretan esto como una consecuencia de la senilidad. Sin duda alguna, llegará el día en que sabremos cuál de estas actitudes instintivas fue la correcta."

NOTAS

1 Mayores detalles se pueden encontrar en los libros de Gamow, Lovett Cline y Ponomariov, mencionados al final de este libro.

2 Esto se refiere sólo a la mecánica cuántica; teorías más elaboradas, como la llamada electrodinámica cuántica, sí permiten, en principio hacer predicciones un tanto más detalladas.

3 La familia De Broglie pronuncia su apellido más o menos en la forma De Broyl; con frecuencia se usa la pronunciación francesa: De Broglí.

4 Los fenómenos de difracción (o de interferencia) son fenómenos típicamente ondulatorios, que aparecen al superponer dos o más ondas; dependiendo de la fase de estas ondas, ellas pueden reforzarse (aumentar la amplitud) o debilitarse (reducir la amplitud) mutuamente. En el caso de partículas, al superponer varios haces, unos siempre refuerzan los otros y jamás se cancelan entre sí, por lo que las partículas no presentan fenómenos de interferencia. Una exposición más amplia puede verse en el libro de esta colección *La luz* de A. M. Cetto citado en la bibliografía al final del libro.

5 El azar puede intervenir en la descripción de un fenómeno —como sería cuanto sale en una tirada de los dados—, debido a que un número enorme de causas, sobre las que no tenemos control y tal vez ni siquiera conozcamos, intervienen en la determinación del resultado. Diríamos que, *como cuestión de principio,* sí tuviéramos los datos y las leyes completas del fenómeno, podríamos predecir *exactamente* lo que va a suceder aun en estos casos. En la mecánica cuántica, por lo que hemos visto, se considera que no existen tales leyes o datos que en principio permitan eliminar la necesidad de una descripción meramente probabilística. Se trata, así de una situación conceptualmente distinta a la clásica.

V. EINSTEIN Y SU TIEMPO

El individuo, con su existencia breve

y frágil, sólo puede encontrarle sentido

a la vida por su actuación sobre la sociedad.

A. EINSTEIN

SE GANÓ LA GUERRA, PERO NO LA PAZ

EINSTEIN fue un hombre profundamente interesado en los problemas de su tiempo. Participó activamente como pacifista y antimilitarista durante el surgimiento del nazismo en Alemania y durante las guerras mundiales; como respuesta a la conculcación de los derechos del pueblo judío y en particular del derecho a su identidad nacional adoptó a fondo la causa sionista. Como hemos visto, estas actividades y otras similares le ocasionaron dificultades personales muy graves. Durante sus últimos meses en Europa se temía incluso un atentado contra él, por lo que el gobierno belga le proporcionó guardia armada y cuando, obligado a salir de Europa, llegó a Princeton, se mantuvo en silencio su presencia durante algún tiempo. Su actividad política y pública más sistemática se dio durante y, sobre todo, después de la segunda Guerra Mundial, al iniciarse el desarrollo de las armas atómicas y la carrera armamentista. Sus artículos periodísticos, conferencias, ensayos, etc., sobre temas sociales fueron recogidos en varios libros de carácter popular. 1 Cuando, con motivo de una fuerte crítica de Einstein al gobierno nazi, Von Laue le escribió preguntándole si está bien que un físico se involucre en problemas políticos, Einstein le contestó preguntándole a su vez cómo sería el mundo si gente como Bruno, Humboldt, Spinoza o Voltaire no hubieran actuado en asuntos políticos.

Probablemente la intervención política mas conocida de Einstein sea la carta que dirigió al presidente Roosevelt para urgirlo a que se tomaran medidas para el desarrollo de la bomba atómica. 2 Desde 1938, Leo Szilard —su antiguo colaborador de Berlín y compañero de inventos— había emigrado a los Estados Unidos. Hombre de profundas convicciones políticas, en agosto de 1939 Szilard se dirigió en compañía de su colega, el también físico húngaro emigrado Eugene Wigner (1902-) a casa de Einstein, para solicitarle su intervención frente al presidente Roosevelt con el objeto de hacerle ver el riesgo que implicaría para la humanidad el que la bomba atómica —hecha posible por los recientes descubrimientos físicos sobre la fisión nuclear 3 que no pudieron ser mantenidos en secreto, como el propio Szilard había propuesto se hiciera— fuera desarrollada primero en la Alemania nazi. 4 Einstein estuvo de acuerdo y al día siguiente firmó una carta redactada por Szilard, la que llegó a su destino.

Aparentemente esta famosa carta no tuvo ningún papel decisivo, aunque Einstein, cuando concluida la guerra supo que la bomba alemana estaba sumamente rezagada, dijo que de haber sabido que ese era el caso, jamás habría firmado la carta. 5 A principios de 1945, una vez más por petición de Szilard, Einstein envió a nombre suyo y de vario colegas, Bohr inclusive, una nueva carta a Roosevelt tratando de frenar el desarrollo y posible uso del arma nuclear, pues era ya claro que Alemania estaba cerca de la derrota y no contaba con ella. Estas gestiones fueron interrumpidas por la muerte de Roosevelt, unas cuantas semanas después. A partir del bombardeo atómico de Hiroshima y Nagasaki por el ejército norteamericano, Einstein adoptó una posición de lucha activa por el desarme y, muy en particular, contra el desarrollo, fabricación y almacenamiento de las armas nucleares. En esta tarea Einstein no estuvo solo, pues una lucha similar emprendieron Bohr, Szilard y muchos otros científicos. En diciembre de 1945 Einstein dictó

una conferencia en Nueva York, que tuvo como lema: "Hemos ganado la guerra, pero no la paz." El título sintetiza excelentemente su preocupación central a partir de ese momento y por el resto de su vida.

En 1946 se creó el Comité de Emergencia de Científicos Atómicos, con Einstein como Presidente, comité que inició de inmediato una campaña para producir "una gran reacción en cadena de consciencia y comunicación" e inició la publicación del famoso *Bulletin of the Atomic Scientists,* desde donde se desplegó —y continúa desplegando— una campaña contra el uso militar de la energía atómica. Años más tarde, el 11 de abril de 1955, Einstein escribió su última carta; iba dirigida a Bertrand Rusell, el gran matemático, filósofo y humanista inglés (1872-970), con la que dio fin a una serie de cartas intercambiadas entre los dos personajes en las últimas semanas. En ella, Einstein aceptaba la forma final de un manifiesto (conocido después como *Manifiesto Einstein-Russell)* y la lista definitiva de firmantes del mismo; en este documento se llamaba a una conferencia para estudiar los peligros de la guerra y de la carrera armamentista; de esta iniciativa surgieron las Conferencias Pugwash, que desde entonces y año con año reúnen a científicos de todo el mundo para avanzar en sus propósitos de desarme y paz.

En 1951 apareció el primer número de la revista del Partido Comunista norteamericano *Monthly Review.* El número se abre con un artículo escrito *exprofeso* por Einstein titulado "¿Por qué el Socialismo?", en el que Einstein concluye que la salida única para los problemas de la sociedad contemporánea es el establecimiento de una economía socialista, acompañada de un sistema educativo dirigido hacia fines sociales. Termina diciendo —era la época en que se iniciaban las persecuciones McCarthystas en los Estados Unidos—: "La claridad sobre los objetivos y problemas del socialismo tiene el mayor significado en nuestra época de transición. Puesto que bajo las presentes circunstancias, la discusión libre e incondicional de estos problemas ha sucumbido a un poderoso tabú, considero que la fundación de esta revista representa un importante servicio público." Paralelamente, también expresó en más de una ocasión y en diversas formas su insatisfacción por la falta de un clima de libertad intelectual en los países del sistema socialista. Por ejemplo, en el mismo documento escribe: "La economía planificada no es socialismo aún; puede ir unida a una completa esclavización del individuo. El socialismo tiene que enfrentarse con un problema político-social, nada fácil de resolver: dentro de una centralización tan grande del poder político y económico, conseguir que la burocracia no se haga excesivamente poderosa y no se magnifique, y que no se atrofie políticamente al individuo, y con él al contrapeso democrático del poder de la burocracia."

EINSTEIN Y LA FILOSOFÍA

Además de su actividad científica y política, Einstein mantuvo a lo largo de su vida un claro interés por la filosofía y, muy en particular, por la epistemología de la física, 6 tema sobre el que escribió algunos ensayos e hizo observaciones, extraídas de su experiencia personal. De ellas es claro que, para él, el principio rector en la búsqueda de las formulaciones teóricas de las leyes de la naturaleza es la simplicidad lógica: si las leyes más generales no son lógicamente simples, pocas esperanzas nos quedan de poder encontrarlas, expresó en alguna ocasión. Asimismo, y extrapolando su experiencia personal con la relatividad general, cada vez estaba más convencido de que el hombre puede llegar a las leyes de la naturaleza a partir del pensamiento abstracto. Esta es la idea central que desarrolló en la última conferencia que tuvo oportunidad de dictar en Europa —se trata de su Conferencia Herbert Spencer, dictada en Oxford el mes de junio de 1933, cuando había ya renunciado a sus puestos en las academias bávara y prusiana y residía temporalmente en Le Coq sur Mer, en Bélgica, preparando su salida definitiva de Europa—. Es sumamente interesante comparar esta tesis con escritos anteriores suyos, pues permite apreciar claramente cómo evolucionó su pensamiento al respecto como resultado de su experiencia con la formulación de la relatividad general. En efecto, hasta antes de 1920 expresó en más de una ocasión la conviccion opuesta, en el sentido de que la argumentación puramente formal —es decir, basada solamente en posibilidades sugeridas por las características matemáticas del problema y sin apoyo en argumentos físicos— fallará prácticamente en todos los casos como mecanismo para encontrar una guía confiable en la solución de problemas físicos nuevos.

En uno de sus primeros encuentros con Solovine, Einstein le explicó que desde muy joven había tenido

interés por la filosofía, pero que la encontró demasiado vaga y arbitraria, por lo que prefirió concentrar su atención en la física. 7 La llama permaneció sin embargo encendida y así, por ejemplo, durante 1943 Einstein, Kurt Goedel (gran matemático austríaco-norteamericano, 1906-1978), Wolfgang Pauli y Bertrand Russell se reunieron periódicamente en casa del primero para discutir temas filosóficos. Los filósofos que mayor influencia tuvieron sobre Einstein, según sus propias palabras, fueron Hume y Spinoza, aunque de sus escritos puede inferirse que conocía ampliamente la obra de otros filósofos, como Platón, Kant, e incluso el propio Russell. Probablemente sea correcto decir que el interés de Einstein por la filosofía y por los problemas fundamentales de la física sean sólo dos aspectos complementarios de un mismo interés general por los problemas más fundamentales y generales del mundo físico.

Un reconocimiento explícito del valor del pensamiento filosófico de Einstein se dio cuando, con motivo de su 70 aniversario, Paul Schilpp, editor de una serie de libros sobre el pensamiento de filósofos vivos, le solicitó a Einstein anuencia para elaborar un volumen referido a él; se trata del libro *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (A.E.: filósofo y científico) que se cita en la bibliografía al final de este libro, y para el cual Einstein escribió las notas autobiográficas que hemos citado varias veces (las que el llamara "su necrología"). En este volumen se analiza la epistemología de Einstein e incluye, entre otras muy valiosas discusiones, una presentación popular y detallada escrita por Bohr sobre su polémica con Einstein, y una respuesta breve de éste, contenida en su "respuesta a mis críticos".

EINSTEIN Y LA MÚSICA

Einstein conservó hasta el final de su vida un vivo amor por la música. Fue precisamente la música lo que le permitió conocer a Besso, otro apasionado de ella, durante una velada musical en Zurich, probablemente hacia 1897. Einstein acostumbraba tocar el violín para sí mismo como una arma de descanso y relajamiento; lo hacía con talento y musicalidad suficientes como para haberse atrevido a tocar en más de una ocasión en público para colectar fondos con fines de beneficencia. Sus compositores predilectos eran Bach y Mozart, así como italianos como Vivaldi, Scarlatti o Corelli; mostraba un claro desinterés por los compositores del siglo XX, e incluso muchos del siglo pasado. Sobre Beethoven dijo que lo respetaba, pero que le resultaba demasiado dramático y personal. Y de Wagner expresó que admiraba su inventiva, pero que la ausencia de estructura la veía como decadente y que su personalidad musical le parecía ofensiva, por lo que su música le producía disgusto.

Presionado para que expresara en público su opinión musical —su inmensa popularidad hacía que los periódicos y revistas recurrieran a él para todo tipo de asuntos—, Einstein señaló que en lo referente a música él no recurría a la lógica, sino que procedía de manera intuitiva y no conocía de teorías musicales. Pero para que una pieza musical le pareciera bella era necesario que él pudiera intuir una unidad interna, la existencia de una arquitectura. Así por ejemplo, comenta que Schubert es uno de sus compositores favoritos por su habilidad superlativa para expresar emoción y su enorme capacidad de invencion melódica; pero que en sus trabajos mayores lo perturba precisamente la falta de arquitectura.

En enero de 1938 Arturo Toscanini recibió la Medalla Norteameriana Hebrea; para esa ocasión Einstein escribió lo siguiente, que tiene un valor que excede en mucho la circunstancia para la que fue escrito:

"Sólo quien se entrega a una causa con todas sus fuerzas y toda su alma puede ser un verdadero maestro. Por esta razón, la maestría demanda todo de una persona y Toscanini lo muestra en cada manifestación de su vida."

EL MANUSCRITO RECONSTRUIDO

En 1943, un comité de recaudación de fondos para sostener el esfuerzo bélico le solicitó a Einstein el original de su manuscrito de 1905 sobre la teoría de la relatividad, para subastarlo. Einstein replicó que se había desecho del manuscrito desde mucho tiempo atrás, pero que estaría dispuesto a hacer una copia tan fiel como los (casi 40) años transcurridos le permitieran. La oferta fue aceptada y Einstein rehizo el manuscrito, encabezándolo con la leyenda: "Las páginas que siguen son una copia de mi primer trabajo

sobre la teoría de la relatividad. Hice la copia en noviembre de 1943." Regaló asimismo un manuscrito reciente de un trabajo no publicado. Ambos documentos se vendieron en una subasta pública en la ciudad de Kansas; el primero lo adquirió la Compañía de Seguros de Kansas (que lo donó a la Biblioteca del Congreso) por la cantidad de 6.5 millones de dólares en bonos de guerra; el segundo lo compró un particular, también a precio estratosférico.

Einstein no usó este tipo de posibilidades en su beneficio personal; de hecho, su actitud fue la contraria, como se ve de la siguiente anécdota. Cuando en 1932 lo invitaron a que formara parte del personal del Instituto de Estudios Avanzados que se estaba creando en Princeton y tuvieron que hablar de remuneración, Einstein solicitó un salario de 3 500 dólares anuales, preguntando a continuación: "¿O podría vivir con menos?" Se le fijó un salario de 15 000 dólares anuales.

Chaim Weizmann, presidente de Israel, murió en noviembre de 1952; el primer ministro Ben Gurión pensó en ofrecerle la presidencia vacante a Einstein "probablemente el más grande hombre vivo". La respuesta de Einstein era clara y definitiva, pero lo inquietó sobremanera el problema de cómo evitarle al embajador y al gobierno israelí el embarazo de su inevitable negativa. La razón formal para no aceptar fue que, independientemente del carácter formal del puesto, como presidente de Israel sería responsable de las acciones del país, y que ellas podrían entrar en conflicto con su conciencia.

LA TEORÍA UNIFICADA

Einstein fue un espíritu independiente y un navegante solitario toda su vida. Esta independencia —que es una necesidad vital en él y a la que ya se refiere en un ensayo escolar escrito a los 17 años en Aarau 8 — le permitió concentrar su labor de investigación en una línea de principio no influida por las modas y nuevas teorías que emergieron alrededor de él. Esto implicó que intencionalmente se marginara de desarrollos tales como la física nuclear, la de partículas elementales, de estado sólido, etc. En alguna forma, esta actitud se manifiesta ya desde su época de estudiante, pues los años de su formación fueron plenos de grandes y trascendentes descubrimientos, que atrajeron hacia sí la atención dominante de los físicos: en l895 Wilhelm Roentgen (físico alemán, 1845-1923) descubrió los rayos X; en 1896 Antoine Becquerel (físico francés 1852-1908) descubrió la radiactividad; en 1897 Joseph John Thomson (físico inglés, 1856-1940) descubrió los electrones estudiando los rayos catódicos. Aparentemente esto no lo desvió de sus inquietudes sobre los problemas de principio que le atraían desde entonces. Así, Einstein fue antes que nada un creador: fundador de la teoría cuántica de la luz, de la relatividad especial y la general, de la teoría física de los procesos azarosos, de la física del estado sólido, de las estadísticas cuánticas, de la cosmología relativista y, finalmente, del intento de la teoría unificada de campo.

En 1922 Einstein publicó su primer trabajo sobre la teoría unificada de los campos gravitatorio y electromagnético; esta teoría, a la cual Einstein dedicaría prácticamente todo su esfuerzo científico desde 1921 hasta su muerte, es una generalización de la teoría general de la relatividad. Su propósito es reunir en un campo global los campos gravitatorio y electromagnético; el punto está en que en la teoría general de la relatividad estos dos campos aparecen como lógicamente independientes, cosa que Einstein consideró siempre insatisfactoria. Asimismo, Einstein abrigaba la esperanza de que una teoría de este tipo predijera la existencia de condensaciones muy intensas y pequeñísimas que pudieran identificarse con las partículas conocidas —en lenguaje coloquial, podríamos decir que de acuerdo con esta visión, las partículas como los electrones, etc., serían algo así como grumos en el caldo; este último sería el campo unificado—. Einstein veía la posibilidad de que esta línea le pudiera conducir hacia la mecánica cuántica, como una unificación esencial de esta teoría con la de la relatividad. En este caso, las propiedades discretas tal vez se generaran debido a la existencia de un número excesivo de condiciones sobre los campos. Aunque Einstein publicó un gran número de trabajos sobre este tópico y logró incluso construir —muy poco antes de su muerte— lo que consideró una teoría con alta probabilidad de ser correcta, no pudo nunca avanzar tanto como para reconstruir a partir de sus resultados la teoría de Maxwell.

Veamos este problema desde una perspectiva más amplia. Debido a su complejidad matemática, no fue tarea simple desarrollar la teoría general de la relatividad y ella quedó varada largos años. Sin embargo,

con el transcurrir del tiempo se fueron encontrando soluciones a muchas de estas dificultades, lo que ha conducido a que esta teoría haya vivido en las dos últimas décadas una etapa de plena efervescencia. Algo similar ha pasado con la cosmología relativista, la que, en una productiva simbiosis con la física de partículas elementales, ha permitido construir una nueva y muy rica visión del origen y evolución del Universo. 9 En la década de los veinte el programa de la teoría unificada propuesto por Einstein tenía un sentido muy inmediato: en aquellos años las únicas partículas elementales conocidas eran el fotón, el electrón y el protón; con tan pocas partículas diferentes a la mano podía uno concebir legítimamente la posibilidad de "crearlas" a partir de un campo unificado apropiado (algo así como tres grumos de diferentes tipos). Sin embargo, ya desde entonces el nuevo programa einsteniano fue recibido con escepticismo e indiferencia (alguna vez Einstein comentó que a diferencia de los religiosos, a la gran mayoría de los físicos no le interesan los problemas de principio). Con el tiempo las cosas se complicaron, pues a partir de la década de los cincuentas la familia de las partículas elementales comenzó a crecer y no ha dejado de hacerlo desde entonces (se conocen ya varios centenares de ellas); esto parece dar al traste con cualquier esperanza de teoría unificada, capaz de generar la materia a partir de los campos.

Sin embargo, en la década de los setentas los acontecimientos empezaron a evolucionar hacia otros rumbos: aparecieron nuevas teorías que contienen unos cuantos "tabiques" *(leptones, quarks,* etc.), a partir de los cuales se supone que se construyen las partículas elementales conocidas. *Las verdaderas* partículas elementales no son tantas, después de todo, sino sólo unos cuantos tabiques fundamentales. Además, se pudo construir una teoría unificada de campos para las llamadas interacciones débiles 10 y las electromagnéticas; hoy se trabaja intensamente en el siguiente paso, es decir, la unificación de esta teoría con el campo nuclear: éste es básicamente el programa einsteiniano, pero desde una perspectiva contemporánea, mucho más compleja y rica que la original. Vemos ahora que el problema con que se topó Einstein en la construcción. de la teoría unificada de campos no fue de origen conceptual, sino de circunstancia: Einstein estaba demasiado adelantado para su época y se impuso una tarea para la cual no había aún condiciones, ya no de resolverla, sino siquiera de plantearla con la debida generalidad.

LOS ÚLTIMOS AÑOS

En 1935 los Einstein se trasladaron al 112 de la calle Mercer, en Princeton, casa que acababa de adquirir y que se convirtió en su residencia definitiva. Los acompañaba Helen Dukas, la secretaria que había emigrado de Europa con ellos y que empezó a trabajar con Einstein en abril de 1928, cuando él sufría de una larga enfermedad producida por exceso de trabajo. 11 A la muerte de Elsa Einstein, la señorita Dukas tomó bajo su responsabilidad el manejo de la casa y la atención personal de Einstein; a la larga, ella se convirtió (en compañía de Otto Nathan, economista amigo de Einstein) en albacea de los bienes de Einstein y depositaria de su archivo personal.

En 1936, tras larga y penosa enfermedad que lo invalidara física y mentalmente, murió Marcel Grossmann. Einstein no escribió un obituario entonces, pero cuando en 1944 el ETH —donde también se graduaron su hijo mayor, Besso y Grossmann— le solicitó una autobiografía para incluirla en un volumen para conmemorar el centenario de la institución, Einstein apuntó en ella "la necesidad de expresar al menos una vez en mi vida mi gratitud a Marcel Grossmann..."

En 1939 la hermana Maja viene a vivir a casa de Einstein, después de salir de Florencia, expulsada por las leyes racistas de Mussolini. Su esposo, Paul Winteler, se va a Ginebra con los Besso (recuérdese que la señora Besso era su hermana). En 1946, cuando Maja se preparaba para regresa a Europa, sufrió un ataque al corazón que la dejó inválida por el resto de su vida. Einstein la atendía en la medida de sus posibilidades. Murió en 1951; un año después falleció su esposo, en casa de los Besso.

Poco a poco, Einstein se fue retirando del violín, contentándose con tocar algunos acordes al piano de vez en cuando —la música fue siempre para él una manera de reposar—. Su salud se fue deteriorando. En 1948 se le detecta un aneurisma muy grande en la aorta abdominal; con el tiempo, el aneurisma se va desarrollando y le produce serios trastornos de salud y dolores intensos frecuentes. El 13 de abril de 1955 —a escaso un mes de la muerte de Michele Besso— el aneurisma se rompe y Einstein es hospitalizado de

emergencia. No acepta que se le opere y se resiste al uso de la morfina, aunque pregunta al médico si será muy difícil el final. El 17 de abril le solicita a Helen Dukas las hojas con sus últimos cálculos y material para escribir.

A la 1:15 A. M. del 18 de abril, Einstein muere y su cuerpo es cremado el mismo día. Por propia disposición, sus cenizas son dispersadas por Otto Nathan en un lugar no revelado. El doctor Thomas Harvey hizo la autopsia y aprovechó la oportunidad para extraer el cerebro y conservarlo.

NOTAS

1 Véase la bibliografía al final del libro.

2 Esta carta se reproduce en el Apéndice 3.>

3 *La fisión nuclear* es un proceso físico por el cual un núcleo atómico pesado se rompe en dos fragmentos al ser bombardeado con alguna partícula (normalmente un neutrón lento). En ciertos casos, como con el uranio, la masa total de los fragmentos es menor que la masa inicial; la masa faltante se libera como energía, principalmente térmica. Si este proceso se realiza en cadena y en forma rápida e incontrolada, la gran energía liberada produce una tremenda explosión. El mismo proceso realizado bajo control se usa en los reactores nucleares para producir vapor y generar electricidad.

4 Muchos físicos "arios", como Planck. Von Laue, Sommerfeld, etc., permanecieron en Alemania durante la guerra, pero presentaron una resistencia abierta contra el nazismo y mantuvieron su dignidad hasta el final. El ejemplo más trágico del físico que abrazó voluntariamente la ideología nazi es el de Lenard, quien fue desde el principio el organizador de las campañas anti-Einstein y contra la *ciencia judía*.>

5 En el desarrollo de la bomba atómica norteamericana participó una pléyade de físicos, entre quienes estaban Enrico Fermi (magistral físico teórico y experimental) italiano, 1901-1954), Wigner, el propio Szilard, Compton, e incluso Bohr, quien se encontraba de incógnito en los Estados Unidos con pasaporte inglés y bajo el nombre de John Baker, después de una escapatoria espectacular de Europa en compañía de su hijo.

6 Aquí usamos la palabra epistemología en su acepción de *Filosofía de la ciencia.* En téminos filosóficos más generales, por epistemología se entiende la teoría del *conocimiento*

7 Es interesante comparar esta afirmación con la actitud, por ejemplo, de Bertrand Russell, quien fue en su juventud un destacadísimo matemático, a edad madura dejó las matemáticas por la filosofía.

8 En este breve ensayo, escrito para su curso de francés, sobre sus proyectos para el futuro, explica que ha decidido estudiar física teórica y matemáticas, por tener capacidad y gusto para ello (y por falta de sentido práctico, agrega). Terminando una razón adicional: "Además hay una cierta independencia en la profesión científica que me gusta mucho".

9 Para mayor información sobre estos temas, el lector interesado puede consultar en esta misma colección los libros de S:Hacyan y de L:F: Rodríguez, citados en la bibliografía.

10 Las interacciones débiles son las que producen fenómenos como la transformación de un neutrón en un protón, un electrón y un neutrino. Pese a su nombre, son considerablemente más intensas que las gravitatorias aunque débiles respecto a las electromagnéticas.

11 Se trató de un problema cardiaco (engrandecimiento de corazón). que lo mantuvo en cama por cuatro meses y demandó más de un año para la recuperación total.<

APÉNDICE 1

LOS TRABAJOS ESCRITOS POR EINSTEIN EN BERNA

Se presenta una lista brevemente comentada de los trabajos escritos por Einstein hasta el momento en que salió de Berna. La primera fecha que se da es la de recepción del trabajo por el editor de la revista: la segunda, la de publicación. Se emplea un lenguaje un poco más técnico que el usado en el cuerpo del libro.

1. "Consecuencias del fenómeno de capilaridad". 16 de dic.

1900; *Ann. Phys.* 4 (1901) 513. Este trabajo fue escrito en Zurich.

2. "Sobre la teoría termodinámica de la diferencia de potencial entre metales y sobre un método eléctrico de investigación de las fuerzas moleculares". 30 de abril de 1902: *Ann. Phys*. 8 (1902) 798. Este trabajo lo conduce a estudios termodinámicos (trabajos 3-5) y sobre el movimiento browniano (trabajos 6, 8, 9, 14, 15). El contenido de este artículo fue preparado en Schaffhausen.

3. "Teoría cinética del equilibrio térmico y el segundo principio de la termodinámica". 26 de julio 1902; *Ann. Phys.* 9 (1902) 417. Einstein introduce la idea de *conjunto estadístico (ensemble*) y construye una teoría molecular de la termodinámica que desarrolla ulteriormente en los trabajos 4 y 5.

4. "Teoría de los fundamentos de la termodinámica". 26 de enero 1903; *Ann. Phys.* 9(1903)170. En este trabajo queda establecida la mecánica estadística.

5. "Sobre la teoría molecular general del calor". 29 de marzo 1904; *Ann. Phys.* 14 (1904) 351 Continuación del anterior; se introducen las fluctuaciones. Einstein aplica su teoría estadística a la radiación; estas ideas se desarrollan ulteriormente en el trabajo 7.

6. "Nueva determinación de las dimensiones de la molécula". 30 de abril 1905; *Ann. Phys.* 19 1906 289 Primer trabajo de. Einstein sobre el movimiento browniano, en el que aparece la famosa relación de fricción, es decir, el primer *teorema de fluctuación-disipación* conocido. Este trabajo lo presentó Einstein como su tesis doctoral y es uno de los más citados en la actualidad.

7. "Un punto de vista heurístico respecto a la creación y transformación de la luz". 18 de marzo (1905): *Ann. Phys.*17 (1905)132. Con este trabajo se funda esa teoría cuántica de la radiación; los resultados se aplican al estudio del efecto fotoeléctrico. Es especialmente citado al otorgársele a Einstein el premio Nobel. Es el trabajo más revolucionario de Einstein. Fue reproducido en *Ann. Phys.*33 (1965) 367 en su 60 aniversario.

8. "Sobre el movimiento de partículas suspendidas en un líquido en reposo, según la teoría cinético-molecular del calor". 11 de mayo; *Ann. Phys,* 17 (1905) 549. Primer trabajo publicado sobre la teoría del movimiento browniano. Funda la teoría física de procesos estocásticos.

9. "Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento" 30 de junio 1905; *Ann. Phys.* 17 (1905) 891. Con este trabajo nace la teoría de la relatividad.

10. "¿Depende la inercia de un cuerpo de la energía que contiene?" 27 de sept. 1905; *Ann. Phys.* 18 (1905) 639 Se deriva la fórmula $\boldsymbol{E = mc^2}$.

11. "Sobre la teoría del movimiento browniano", 19 de dic. 1905; *Ann. Phys.* 19 (1906) 371.

12. "Sobre la teoría de la emisión y absorción de la luz".13de marzo 1906; *Ann. Phys.* 20 (1906) 299.

13."Ley de conservación del movimiento del centro de masa y de la inercia de la energía". 17 de mayo 1906; *Ann Phys.* 20 (1906) 627.

14. "Un método para determinar la relación entre las masas transversal y longitudinal de un electrón". 4 de agosto de 1906; *Ann. Phys.* 21 (1906) 583.

15. "La teoría de la radiación de Planck y la teoría de los calores específicos". 9 de nov. 1906; *Ann. Phys* 22 (1907) 180. Con este trabajo Einstein funda la teoría cuántica de los calores específicos; representa el primer tratamiento cuántico del movimiento de las moléculas de un sólido, por lo que con él se funda la teoría cuántica del estado sólido.

16. "Corrección al anterior". 3 de marzo 1907; *Ann. Phys.* 22 (1907) 800.

17."Sobre los límites de aplicabilidad de un teorema sobre el equilibrio termodinámico y sobre la posibilidad de una nueva determinación de los cuantos elementales". 2 dic. 1906; *Ann. Phys.* 22 (1907) 569.

18. "Observaciones teóricas sobre el movimiento browniano". Enero de 1907; Zs. *Elektrochem.* 13 (1907) 41.

19. "Sobre la posibilidad de una nueva demostración del principio de relatividad". 17 de marzo 1907; *Ann. Phys.* 23 (1907)197.

20. "Sobre la nota de P. Ehrenfest "Movimiento de translación de electrones deformables y el teorema de las áreas". 16 de abril 1907; *Ann. Phys*. 23 (1907) 206.

21. "Sobre la inercia de la energía, según demanda el principio de la relatividad". 14 de mayo 1907; *Ann. Phys.* 23 (1907) 371.

22. "Sobre el principio de relatividad y sus consecuencias".4 de dic. 1907; *Jahrb. d. Radioaktiv u. Elektronik* 4 (1907)411. Trabajo de revisión sobre la teoría de la relatividad, solicitado por Stark, el editor del anuario. Aquí introduce Einstein el principio de equivalencia *(la idea más feliz de mi vida)* y da el primer paso firme hacia la teoría general de la relatividad; descubre la desviación de la luz por un campo gravitatorio y el corrimiento hacia el rojo.

23. "Un nuevo método para medir pequeñas cantidades de electricidad". 13 de feb. 1908; Phys. Zs. 9 (1908) 216. Einstein propone un electrómetro de la alta sensibilidad, esperando que con su ayuda se puedan medir las fluctuaciones de la carga eléctrica de un conductor debidas a la agitación térmica. No lo construye por el momento por falta de medios.

24. "Teoría elemental del movimiento browniano" 1 de abril 1908: *Zs. Elektrochem.* 14 (1908) 235. Trabajo de revisión escrito para químicos por sugerencia de Lorentz, muy citado aún en nuestros días.

25. "Sobre las ecuaciones electrodinámicas fundamentales de un cuerpo en movimiento". 2 de mayo 1908; *Ann. Phys.* 26 (1908) 532. En colaboración con J. Laub. Los autores adoptan aquí el método del espacio-tiempo propuesto ese mismo año por Minkowski.

26. "Sobre las fuerzas ponderomotrices que actúan en el campo electromagnético sobre un cuerpo en reposo". 18 de mayo; *Ann. Phys.* 26 (1908) 541. En colaboración con J. Laub.

27. "Observación sobre el trabajo 25 con J. Laub". 19enero1909; *Ann. Phys.* 28 (1908) 445.

28. "Observación sobre el trabajo de Misimanoff 'Sobre las ecuaciones fundamentales...'" 22 de enero 1909; *Ann. Phys.* 28 (1909) 885.

29. "Sobre la situación actual del problema de la radiación" 23 de enéro 1909: *Phys. Zs.* 10 (1909)185.

30. "Sobre la situación actual del problema de la radiación". 13 de abril 1909: *Phys. Zs* 10 (1909) 323. Nota en colaboración con W. Ritz para aclarar la diferencia esencial de interpretación de los potenciales retardados entre estos dos autores, la que se puso en evidencia en el trabajo anterior.

31. "Sobre el desarrollo de nuestras opiniones respecto a la naturaleza y la estructura de la radiación". En *Phys. Zs.* 10 (1909) 817. Primer trabajo presentado por Einstein (por invitación) a un congreso (el 81 de la Sociedad Alemana de Naturalistas, realizado en Salzburgo). Einstein señala la necesidad de usar conceptos corpusculares y ondulatorios a la vez para describir el comportamiento de los sistemas cuánticos (primera formulación de la *dualidad onda-corpúsculo*).

Indice | Siguiente

APÉNDICE 2

APARATO PARA DEMOSTRAR

EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

La figura ilustra un aparato sencillo que permite demostrar el principio de equivalencia de Einstein. El aparato está construido como sigue (Figura 6)*.

Una esfera transparente de plástico rígido contiene un taza en la que puede asentarse una bola de bronce. Esta bola se halla unida por un hilo delgado de nylon a un resorte débil, detenido de un palo de escoba de metro y medio de longitud aproximadamente. El resorte no es lo suficientemente fuerte como para recolocar a la bola de bronce cuando se le saca de su asiento.

¿Cómo se puede usar este instrumento casero para demostrar el principio de equivalencia?

RESPUESTA. Tomándolo del palo, elevar el aparato verticalmente hasta que toque el techo de la habitación; dejarlo deslizarse libremente entre las manos (que sólo lo guían para evitar aporrear a los amigos). Cuando el aparato cae, la esfera grande de plástico y la bola están igualmente aceleradas y no hay fuerza gravitacional debido al principio de equivalencia; así, la pequeña tensión del resorte es ahora suficiente para jalar la bola y colocarla en la taza.

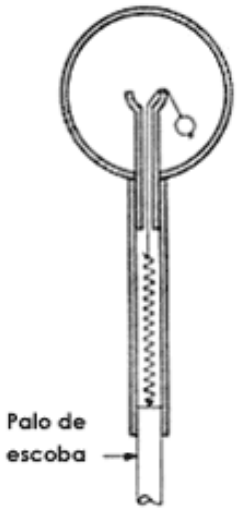


Figura 6. Aparato para mostrar el principio de equivalencia.

NOTAS

* Esta "versión einsteiniana" de un juguete infantil fue ideada por Eric Rogers y su esposa, quienes se lo obsequiaron a Einstein en ocasión de su 76 aniversario, días antes de su muerte.

APÉNDICE 3

CARTA DE EINSTEIN AL PRESIDENTE ROOSEVELT

En la página siguiente se reproduce la carta que, por sugerencia de Szilard, Einstein envió al presidente F. D. Roosevelt en agosto de 1939; a continuación se da la transcripción al español. Incidentalmente, es interesante comentar que el original de esta carta fue subastado en fecha reciente (diciembre de 1986) en Nueva York por la cantidad de 220 mil dólares; el comprador fue un particular.

Albert Einstein

Old Grove Rd.

Nassau Point

Peconic, Long Island

Agosto 2, 1939

F. D. Roosevelt,

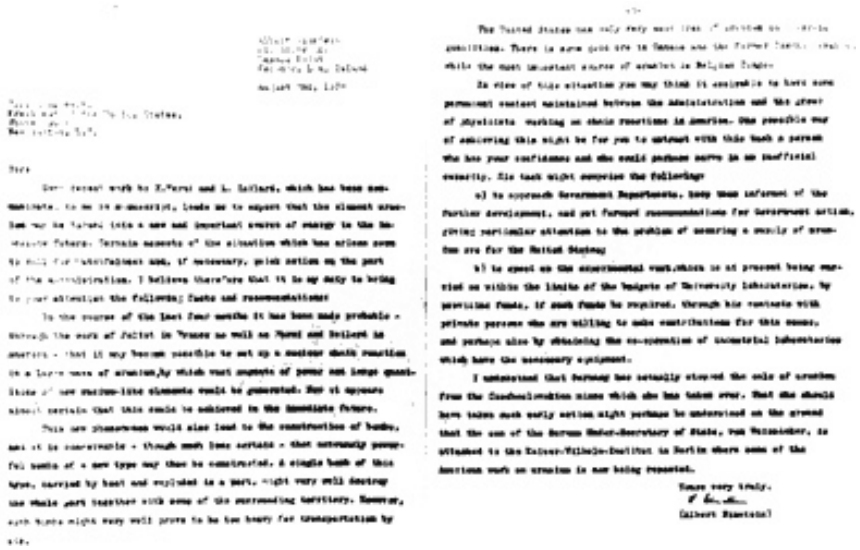
Presidente de los Estados Unidos,

Casa Blanca

Washington, D.C.

Señor:

Un trabajo realizado recientemente por E. Fermi y L. Szilard, que he conocido en forma de manuscrito, me lleva a suponer que el elemento uranio puede ser transformado en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato. Algunos aspectos de la situación que se ha presentado parecen demandar atención y, en caso necesario, de acción rápida por parte de la Administración. Creo por lo tanto que es mi obligación poner a su atención los siguientes hechos y recomendaciones:



Facsímil de la carta de Einstein al presidente Roosevelt.

En el curso de los últimos cuatro meses se ha hecho probable —mediante el trabajo de Joliot en Francia y de Fermi y Szilard en Norteamérica —la posibilidad de efectuar una reacción nuclear en cadena en una masa grande de uranio, por la cual serían generados un enorme poder explosivo y grandes cantidades de nuevos elementos radiactivos.

Por ahora parece casi seguro que esto podría lograrse en el futuro inmediato.

Este nuevo fenómeno podría conducir también a la construcción de bombas, y es concebible —aunque mucho menos seguro— que bombas extremadamente poderosas de un nuevo tipo puedan así ser construidas. Una sola bomba de este tipo, transportada por barco y detonada en un puerto, podría destruir totalmente el puerto y parte del territorio aledaño. Sin embargo, bien podría suceder que tales bombas resultaran demasiado pesadas para su transportación por aire.

Los Estados Unidos poseen sólo minerales muy pobres en uranio y en cantidades reducidas. Existen yacimientos excelentes en Canadá y en la antigua Checoslovaquia, mientras que la fuente más importante de uranio es el Congo Belga.

En vista de esta situación, puede considerar conveniente mantener algún contacto permanente entre la Administración y el grupo de físicos dedicados al estudio de las reacciones en cadena en Norteamérica. Una forma de lograr esto podría ser que asignara esta tarea a alguna persona de su confianza, quien posiblemente podría actuar de manera extraoficial. Sus tareas podrían incluir las siguientes:

a) Establecer relaciones con los diversos Departamentos de Gobierno, mantenerlos informados sobre los futuros desarrollos y proponer líneas para las acciones del Gobierno, prestando atención particular al problema de asegurar una fuente de minerales de uranio a los Estados Unidos.

b) Acelerar el trabajo experimental que al presente es realizado dentro de los límites que fijan los presupuestos de los laboratorios universitarios, proporcionando fondos, si tales fondos son requeridos, mediante sus contactos con las personas privadas que deseen contribuir a esta causa, y quizá también obteniendo la cooperación de los laboratorios industriales que poseen el equipo adecuado.

Tengo entendido que Alemania ha suspendido la venta de uranio de las minas checoslovacas que ha ocupado. Que haya tomado esta temprana decisión probablemente debiera entenderse tomando en cuenta que el hijo del subsecretario de Estado alemán Von Weizacker, pertenece al Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín, donde se está actualmente rehaciendo parte del trabajo norteamericano sobre el uranio.

Sinceramente suyo. (*f i r m a*)

(Albert Einstein)

Indice | Siguiente

LECTURAS SUGERIDAS

A) LECTURAS GENERALES

El lector interesado puede encontrar descripciones más detalladas de varios de los temas tratados o tocados en este libro en las siguientes obras.

Dentro de esta misma colección:

Eliezer Braun

13. *Un movimiento en zigzag*

19. *Una faceta desconocida de Einstein*

Ana María Cetto

La luz

Jorge Flores et al

3. *Una ojeada a la materia*

Leopoldo GarcíaColín S.

5. *De la máquina de vapor al cero absoluto* L. GarcíaColín, M. Mazari, M. Moshinskí et al

14. *Niels Bohr: científico filósofo y humanista* Luis Felipe Rodríguez

1. *Un Universo en expansión*

Shahen Hacyan

6. *El descubrimiento del Universo*

Fermín Viniegra

7. *Una mecánica sin talachas*

En otras colecciones:

George Gamow

Biografía de la física, Alianza Editorial, Madrid, 1980

Bárbara Lovett Iine,

Los creadores de la nueva física, Fondo de Cultura Económica (Breviarios 134)1985.

L. Ponomariov,

Alrededor del cuanto, Editorial Mir, Moscú, 1974.

B) ESCR ITOS DE EINSTEIN PARA EL PÚBLICO GENERAL

Ensays on Science. Philosophical Library. Nueva York., 1934,

The World as I see it. Londres, 1935.

The Evolution Physics (con L. Infeld). Cambridge University Press, 1938.

"Autobiographical Notes" en el libro *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* Evanston, III., 1949 (ésta es la "necrología" de Einstein).

Out of My Latter Years. Nueva York., 1950, Existe traducción al español: *De mis últimos años.* Aguilar, México. 1969.

Ideas and Opinions, Nueva York, 1954.

"Space-Time." artículo en la *Enciclopedia Británica* (de carácter general pero un tanto técnico).

Einstein on Peace, compilado por O. Nathan y H. Norden, Nueva York., 1960.

Albert Einstein. The Human Side. New Glimpses from his Archives, Compilado por H. Dukas y B. Hoffman, Princeton, 1979.

C) BIBLIOGRAFÍAS DE EINSTEIN

Existe un gran número de biografías de Einstein; entre ellas, destacamos las siguienes:

Albert Einstein; Creator and Rebel, H. Dukas y B. Hoffman. Viking Press, Nueva, York., 1972. Escrito por la exsecretaria y un excolaborador científico de Einstein, es una excelente obra.

Albert Einsten, a. Biographical Portrait, Anton Reiser, A. & C. Boni. Nueva, York, 1930. A. Reiser es el seudónimo de Rudolf Kayser, el esposo de Ilse Einstein; Einstein consideró ésta su mejor biografía; fue escrita hacia 1930.

Albert Einstein, C. Seeling, Europa Verlag, 1960,

Einstein, The Life and Times, R. W. Clark, Hodder and Stoughton, Londres, 1973. Una obra muy documentada.

Subtle is the Lord... The Science and the Life of A. Einstein, A. Pais, Oxford University Press, Oxford, 1982. El autor, conocido físico teórico, trató extensamente a Einstein durante sus últimos años. Este es un libro muy bien escrito, pero altamente técnico.

D) LIBROS SOBRE EINSTEIN Y EN SU HOMENAJE

Albert Einstein: perfiles y perspectivas. Compilado por R. Rodríguez y S. Hojman, UNAM-Nueva imagen, México, 1987.

Einstein, Varios autores, CONACYT, México, 1979.

En el centenario de Einstein, Varios autores, El Colegio Nacional, México, 1981.

Einstein, A Centenary Volume. Editado por A. P. French Harvard University Press, 1979.

Lo que verdaderamente dijo Einstein, J. Wagner, Aguilar, México, 1974. Traducción de la edición alemana de 1974.

EINSTEIN:

Una vida en fotografías

Primera fotografía conocida de Einstein.

Maja Einstein.

Albert Einstein en su época de Aarau (1896).

Casa de Einstein en Berna, Kramgasse 49, hoy museo.

Lieferung neuer Hektographen,
sowie zum Umguss oder Neufüllung
Franz Annoler, Malerweg 9 (Längg.)
u. Vereinsdruckerei.
Guss von Wälzchen für Kimiographen.

Vermischtes

Privatstunden in
Mathematik u. Physik
für Studierende und Schüler erteilt
gründlichst
Albert Einstein, Inhaber des eidgen.
polyt. Fachlehrerdiploms,
Gerechtigkeitsgasse 32, 1. Stock.
Probestunden gratis. 4977

Kapital-Gesuch.

4983 Ein junger, strebsamer Handwerksmann sucht, um sein Geschäft

Mädchen,

eiderin,

Lad

Pensio

Vorzeid

Anuncio en el periódico insertado por Einstein (1902). La traducción es: Clases particulares intensivas de matemáticas y física para estudiantes y alumnos. Albert Einstein, con diploma federal de maestro. Calle de la Justicia 32, 1er. piso. Clase de prueba gratis.

Albert Einstein en su época de Berna (alrededor de 1905).

La "Academia Olimpia". De izq. a der.: Conrad Habicht, Maurice Solovine, Albert Einstein.

Mileva Maric y Einstein (1911).

Participantes al Primer Congreso Solvay, Bruselas, 1911.

Marcel Grossmann (alrededor de 1920).

Tarjeta postal enviada por Einsten a sus madre (27 de sep. de 1919). Las primeras frases son: "Hoy hay buenas noticias. H. A. Lorentz me ha telegrafiado que las expediciones inglesas han confirmado definitivamente la deflexión de la luz por el Sol."

Siluetas de Einsten , la esposa Elsa y las hijas ILse y Margot, recortadas por el propio Einstein en 1919.Fueron pegadas en la primera página del cuento *Viaje de Pedrito a la Luna*,para un regalo infantil.

Einstein en la época de su coronación (1920).

Recepción popular de Einstein en Nueva York en 1921.

Albert y Elsa Einstein a bordo del *Celtic.* 1922

Participantes al 5o. Congreso Solvay, Bruselas, 1927.

Max Plank y Albert Einstein, el día en que Plank recibió la primera y Einstein la segunda Medalla Max PLank (1929).

Albert Einstein y Michele Besso (alrededor de 1925).

Nr. 140217

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT

EIDGEN. AMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

PATENTSCHRIFT

HAUPTPATENT

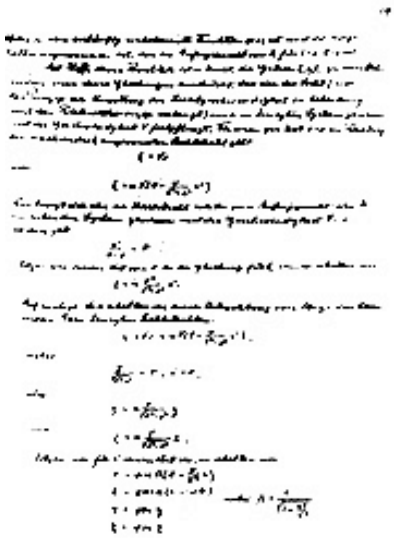
Prof. Dr. Albert EINSTEIN, Berlin, und Dr. Leo SZILARD, Berlin-Wilmersdorf (Deutschland).

Página inicial de una patente de un refrigerador concedida a Einstein y Szilard (Suiza, 1930). Einstein y Szilard obtuvieron juntos varias decenas de patentes.

Leo Szilard.

Albert Einstein y Niels Bohr: fotografía tomada por P. Ehrenfest.

El clima político en Berlín en los años en que Hitler toma el poder: policías de la SAcolaboran en el boicot a una tienda propiedad de judíos (1933).



Facsímil de la página 9 de la copia hecha por Einstein en 1943 de su manuscrito sobre la teoría de la

relatividad de 1905.

Chico, Helen Dukas y Einstein en Princeton (alrededor de 1950).

Hiroshima, 1945.

Niños festejando a Einstein en su 70 aniversario (abril de 1949).

Simposio en Princeton conmemorando el 70 aniversario de Einstein. En la primera fila Kurt Goedel, Einstein y Robert Oppenheimer.

Albert Einstein en los años cincuenta.

Otto Nathan y Einstein.

Última fotografía conocida de Einstein, fue tomada enfrente de su casa de Princeton en marzo de 1955.

Indice

Siguiente

COLECCIÓN DEL FCE

Economía

Sociología

Historia

Filosofía

Antropología

Política y Derecho

Tierra Firme

Psicología, Psiquiatría y Psicoanálisis

Ciencia y Tecnología

Lengua y Estudios Literarios

La Gaceta del FCE

Letras Mexicanas

Breviarios

Colección Popular

Arte Universal

Tezontie

Clásicos de la Historia de México

La Industria Paraestatal en México

Colección Puebla

Educación

Administración Pública

Cuadernos de La Gaceta

Río de Luz

La Ciencia desde México

Biblioteca de la Salud

Entre la Guerra y la Paz

Lecturas de El Trimestre Económico

Coediciones

Archivo del Fondo

Monografías Especializadas

Claves

A la Orilla del Viento

Diánoia

Biblioteca Americana

Vida y Pensamiento de México

Biblioteca Joven

Revistas Literarias Mexicanas Modernas

El Trimestre Económico

Nueva Cultura Económica

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de diciembre de 1996 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F.

Se tiraron 2 000 ejemplares.

La ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.

Indice

Siguiente

CONTRAPORTADA

A pocos años de terminar el siglo xx, las listas de personajes que se seleccionan con el objeto de escoger a los hombres más destacados del siglo varían considerablemente, mas en todas ellas figura Albert Einstein. Uno de los fines de este libro es intentar una explicación sobre el porqué de tal unanimidad en torno a un hombre cuyas teorías científicas resultan de comprensión difícil incluso para las mentes más avanzadas pero que, curiosamente, tuvo una trayectoria vital de rostros tan variados, tan cercana a la de todos los hombres, que no resulta difícil identificarse con él en varios de sus aspectos o al menos estar de acuerdo con las posiciones que asumió en su larga y fecunda vida. Si, al parecer, los mortales comunes y corrientes nos sentimos lejanos de las concepciones einstenianas sobre el espacio y el tiempo, en cambio no resulta difícil simpatizar con este hombre tan lejano de la solemnidad con que revisten los supuestos grandes personajes y tan comprometido con todos los movimientos que buscan alcanzar una sociedad en la que todos los hombres puedan desarrollar al máximo sus capacidades en un marco de justicia.

"En este libro —nos dice el doctor Luis de la Peña— se habla de Einstein, de su obra, de su tiempo. Es un libro escrito para aquellas personas que por su edad o sus ocupaciones no han tenido oportunidad de asomarse al mundo de la ciencia pero que están interesadas en ella. Es un libro sencillo sobre una de las personalidades más grandes que ha dado la humanidad y cuya intención principal es ayudar a entender un poco la labor de este notable científico sin tener que leer páginas y más páginas de física".

En Albert Einstein: navegante solitario, De la Peña explica en forma clara las aportaciones del sabio al mundo de la física. Señala para ello el campo en que se movían la mecánica y la física llamadas clásicas y la manera como un grupo notable de científicos, entre ellos Einstein, lo revolucionaron en los primeros años del siglo xx a tal grado que no hubo campo del pensamiento humano que no resultara afectado, que no comenzara a ser apreciado con un enfoque nuevo.

Luis de la Peña estudió ingeniería en la ESIME del Instituto Politécnico Nacional. Se doctoró en física teórica en la Universidad Lomonosov de Moscú. Autor de dos libros de texto y de numerosos trabajos de su especialidad es, en la actualidad, investigador titular C. del Instituto de Física de la UNAM y miembro de la Sociedad Mexicana de Física y del Sistema Nacional de Investigadores.

Indice